



Manejo agroecológico de suelos de sabanas bien drenadas del estado Guárico (Venezuela) y su efecto en los macroinvertebrados edáficos



Jimmy Antonio Morales Márquez

Tesis Doctoral
2017

Directores:

Dr. Raimundo Jiménez Ballesta

Dra. Rosa Mary Hernández



MANEJO AGROECOLÓGICO EN SUELOS DE SABANAS BIEN DRENADAS
DEL ESTADO GUÁRICO (VENEZUELA) Y SU EFECTO EN LOS
MACROINVERTEBRADOS EDÁFICOS

JIMMY ANTONIO MORALES MÁRQUEZ

Memoria presentada para optar al Grado de Doctor por la
Universidad Autónoma de Madrid

Bajo la dirección de:

Raimundo Jiménez Ballesta

Departamento de Geología y Geoquímica
Universidad Autónoma de Madrid

Rosa Mary Hernández Hernández

Instituto de Estudios Científicos y Tecnológicos
Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez (Venezuela)

TESIS DOCTORAL

Madrid, octubre de 2017

La presente tesis doctoral se ha realizado dentro del proyecto “Manejo Agroecológico de Suelos de Sabanas Bien Drenadas con Unidades de Producción Cereal-Ganado”, financiado por el Fondo Nacional para la Ciencia, Innovación y Tecnología del Ministerio de Ciencia, Innovación y Tecnología de la República Bolivariana de Venezuela, bajo el número G-2002000398. Se contó con una estancia en el Centro de Estudios para el Desarrollo Agroecológico Tropical del Instituto de Estudios Científicos y Tecnológicos de la Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez, Caracas, Venezuela.

A mi padre y a mi madre, quienes vigilantes, sin serlo, estuvieron
pendientes de todos mis avances

A mi esposa y madre de mis razones de existir, Karina Sánchez, por
estar siempre presente a pesar de las vicisitudes

A mis hijos: Galia, Emiliano e Itzel, motores de impulso en todo momento

A mis hermanos

A la memoria de mis familiares, compañeros y amigos, que, aunque no
estén físicamente, siguen sus vivencias en mi mente.

Agradecimientos

Esta sección, aunque para muchas personas, no sea tan relevante, es, para mí, de gran importancia, pues para la gran mayoría de los nombrados a continuación, este agradecimiento significaría el único pago que les puedo dar por su gran e imprescindible apoyo que, sin éste, no hubiese sido posible esta Tesis. Por lo tanto, quiero agradecer infinitamente:

- A la Dra. Rosa Mary Hernández, co-directora de este trabajo y coordinadora general del proyecto de grupo del cual forma parte la investigación, de donde se tomaron los datos para esta Tesis... por haber depositado su confianza en mí, por su orientación, apoyo y dedicación: gracias.
- Al Dr. Raimundo Jiménez Ballesta, director y tutor de esta Tesis, por su confianza, dedicación, orientación y, sobre todo, por sus alientos y acciones en pro de mi ánimo de seguir adelante, a pesar de las situaciones en contra.
- Al Dr. Ignacio Castro y las Dras. Zenaida Lozano, Elizabeth Ramírez, por su valiosa colaboración en el trabajo de campo, orientación y datos de físico-químicos del suelo.
- A la Biol. Karina Sánchez, por su apoyo, dedicación y colaboración en el trabajo de campo y la edición de este trabajo.
- Al profesor Antonio de Ascencao, del laboratorio de Ecología Animal de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes (Venezuela), por su ayuda en la identificación de los macroinvertebrados edáficos.
- Al Centro de Estudios para el Desarrollo Agroecológico Tropical del Instituto de Estudios Científicos y Tecnológicos de la Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez, Caracas, Venezuela.
- Muy especialmente a mi padre, a mi madre, hijos, esposa y a toda mi familia por estar a mi lado siempre y servir de fuente de inspiración y fuerza para seguir adelante.
- A todas aquellas personas que colaboraron en el campo y la realización de esta Tesis, muchas gracias...

Resumen

Se ha reportado que, en las sabanas bien drenadas de los llanos venezolanos, las actividades agropecuarias intensivas han causado daños al suelo, con consecuencias negativas para el agroecosistema y ambiente en general. Por consiguiente, son necesarias algunas alternativas agroecológicas, lo que requiere conocer la dimensión biológica en este ecosistema. Se ha documentado que, dentro de esta dimensión, la comunidad de macroinvertebrados edáficos, juega un importante papel en el funcionamiento del agroecosistema y por tal su conocimiento es imprescindible.

Con estas premisas, el propósito de este trabajo fue evaluar el impacto del uso de unidades de producción cereal-ganado de corte agroecológico en la comunidad de macroinvertebrados edáficos en una sabana bien drenada del Estado Guárico, Venezuela. Para ello, se caracterizó la comunidad de la macrofauna edáfica, poniendo atención a la estructura y atributos ecológicos, tanto en la sabana natural como en el agroecosistema: cultivo de maíz asociado con *Brachiaria dictyoneura* y *Centrosema macrocarpum*, y bajo diferentes tratamientos de fertilización. Se analizó su variación en el tiempo y su relación con las propiedades físico-químicas del suelo. Adicionalmente, se evaluó la potencialidad del uso de algunos grupos taxonómicos de la macrofauna edáfica y algunos atributos ecológicos de ésta, como indicadores de la calidad del suelo. Se realizaron muestreos en diferentes períodos climáticos y a lo largo de 4 años, con el objetivo de evaluar la variabilidad temporal.

Los resultados revelaron que la macrofauna del suelo natural tuvo una densidad promedio de $243,5 \pm 183,6 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, distribuidos en 32 familias y 11 órdenes, con una diversidad media, en la serie Hill, de $N_1 = 4,5 \pm 2,8$ familias. Estos atributos ecológicos de la macrofauna edáfica mostraron una variación temporal ($r \geq -0,5$, $p < 0,05$), y la estructura de la comunidad, también mostró una variación vertical. La macrofauna edáfica se correlacionó principalmente con las propiedades físicas del suelo, determinantes de la humedad y el intercambio de gases.

Según los resultados, el manejo agroecológico no generó un impacto negativo sobre la comunidad de macroinvertebrados edáficos pero, en general, tampoco la favoreció. Sin embargo, algunos grupos, como Termitidae, fueron beneficiados con la actividad agrícola, aunque en detrimento de la equidad de la comunidad. La influencia de los factores climáticos tuvo más peso que el manejo agrícola sobre la macrofauna del suelo. Algunas propiedades físico-químicas edáficas, pudieron explicar las variaciones registradas a través del tiempo en el manejo agrícola. De éstas, las más importantes, en cuanto a frecuencia de relaciones significativas con los atributos de la macrofauna edáfica, fueron la densidad aparente, porosidad, conductividad eléctrica y fósforo disponible.

Se comprobó la potencialidad y la factibilidad del uso de los macroinvertebrados edáficos, como indicadores de la calidad del suelo. Por un lado, se pudo determinar en este ambiente que la familia Lampyridae, es una familia potencial a usar como indicador de suelos naturales. Mientras que

Blattelidae, Reduviidae y Polydesmidae, pudieran ser indicadoras de suelos intervenidos. Por otro lado, con el uso de indicadores basados en los atributos de la macrofauna del suelo, se pudo inferir que el manejo agrícola que menos impacto tuvo sobre la macrofauna edáfica, fueron los tratamientos sin fertilización de las coberturas vegetales asociadas al cultivo de maíz, siendo la cobertura *C. macrocarpum*, la que menor impacto generó.

Summary

It has been reported that in the well-drained savannahs of the Venezuelan Llanos, intensive agricultural activities have caused damage to the soil, with negative consequences for the agroecosystem and the environment in general. Due to this problem, some agroecological alternatives are required, so it is necessary to know the biological dimension in this ecosystem. It has been documented that, within this, the community of macroinvertebrates of the soil plays an important role in the functioning of the agroecosystem. Therefore, the knowledge of them is preponderant.

The purpose of this work was to evaluate the impact of the use of cereal-livestock units with a agroecological focus on the community of edaphic macroinvertebrates in a well-drained savannah of the Guárico State, Venezuela. The edaphic macrofauna community was characterized, through the structure and ecological attributes, in the natural savannah and in the agroecosystem: corn crop associated with *Brachiaria dictyoneura* and *Centrosema macrocarpum*, under different fertilization treatments. Its variation in time and its relation with the physical-chemical properties of the soil was analyzed. In addition, the potentiality of the use of some taxonomic groups of the edaphic macrofauna and some ecological attributes of this one, as indicators of the state of the soil, was evaluated. Samples were taken in different climatic seasons over 4 years.

The results revealed that the macrofauna of the natural soil had an average density of $243.5 \pm 183.6 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$, distributed in 32 families and 11 orders, with a mean diversity, in the Hill series of $N_1 = 4.5 \pm 2.8$ families. These ecological attributes showed a temporal variation ($r \geq -0.5$, $p < 0.05$). In addition, the structure of the community of macroinvertebrates of the soil showed a vertical variation.

The edaphic macroinvertebrates community correlated, especially with soil physical properties, determinants of moisture and gas exchange. According to the results, agroecological management did not have a negative impact on the community of edaphic macroinvertebrates, but, in general, it did not favor it either. Nevertheless, some groups, like Termitidae, were favored with the agricultural activity, to the detriment of the equity of the ecological structure of the community. The influence of the climatic factors had more weight than the agricultural management on the macrofauna of the soil. Some variations in the physical-chemical properties, could explain the variations recorded over time. The most important physical-chemical properties of the soil were the apparent density, porosity, electrical conductivity and available phosphorus in terms of the frequency of significant relationships with the attributes of the edaphic macroinvertebrates community.

Potentiality and feasibility of the use of edaphic macroinvertebrates were checked as indicators of soil status. On the one hand, it was possible to determine that the Lampyridae family is a potential family to use as an indicator of natural soils in this environment. While Blattellidae, Reduviidae and

Polydesmidae, could be indicative of intervened soils. On the other hand, with the use of indexes based on the attributes of the macrofauna of the soil, it was possible to infer that the agricultural management, which had less impact on the edaphic macroinvertebrate community, was the treatments without fertilization of the vegetal coverings associated to the crop of maize, and within these, the coverage with *Centrosema macrocarpum*, was the one that produced less impact.

Índice

	Página
1. Introducción	1
2. Objetivos.....	25
3. Materiales y Métodos	27
3.1. Descripción del área de estudio	27
3.2. Diseño del estudio	30
3.2.1. Preparación del suelo para cultivos	31
3.2.2. Establecimiento de los tratamientos.....	31
3.2.3. Siembra del cultivo de maíz	33
3.2.4. Muestreos.....	34
3.2.4.1. Muestreo de suelo	34
3.2.4.2. Muestreo de macroinvertebrados edáficos	36
3.2.4.3. Muestreos de macroinvertebrados edáficos para el estudio en la sabana natural.....	39
3.2.4.4. Muestreos de macroinvertebrados edáficos para el estudio del efecto del manejo: coberturas y tratamientos.....	40
3.3. Cálculo y procesamientos estadísticos	41
4. Resultados y Discusión	45
4.1. Sabana Natural	45
4.1.1. Estructura de la comunidad de macroinvertebrados edáficos	45
4.1.2. Variación vertical y temporal de la macrofauna del suelo	48
4.1.2.1. Variación vertical	48
4.1.2.2. Variación temporal	50
4.1.3. Relación de la macrofauna edáfica y las propiedades del suelo	55

4.2.	Manejo agrícola de la sabana y su efecto en la macrofauna edáfica	61
4.2.1.	Efecto en la estructura de la comunidad de macroinvertebrados edáficos	62
4.2.2.	Efecto del manejo agroecológico en la variación vertical de la macrofauna edáfica	68
4.2.3.	Efecto del manejo agrícola sobre la macrofauna edáfica en el gradiente temporal	70
4.2.4.	Efecto del manejo agrícola en la relación de la macrofauna del suelo con las propiedades edáficas	76
4.3.	Efecto de los tratamientos de fertilización en la macrofauna edáfica	84
4.3.1.	Efecto en la estructura de la comunidad de macroinvertebrados edáficos	84
4.3.2.	Efecto de la fertilización en la variación temporal de la macrofauna edáfica	89
4.3.3.	Efecto de la fertilización en la relación propiedades del suelo y macrofauna edáfica	96
4.4.	Los macroinvertebrados edáficos como potenciales indicadores de la calidad del suelo	106
5.	Conclusiones	118
6.	Bibliografía	122

Índice de Tablas

Página

Tabla 1.	Características fisicoquímicas iniciales del suelo estudiado en la Estación Experimental La Iguana, Guárico, Venezuela	29
Tabla 2.	Distribución de tiempo de muestreo para el estudio de los macroinvertebrados edáficos y de suelo en una sabana natural bien drenada, y cobertura vegetal <i>Brachiaria dictyoneura</i> (Bd) y <i>Centrosema macrocarpum</i> (Cm), en los llanos venezolanos	41
Tabla 3.	Funciones de normalización de las variables por estudio	44
Tabla 4.	Densidad de ordenes y familias ($\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$) de la comunidad de macroinvertebrados edáficos en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos.....	47
Tabla 5.	Densidad ($\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$), riqueza y diversidad de especies de los macroinvertebrados edáficos en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos. Desviación estándar entre paréntesis.....	50
Tabla 6.	Valores de correlación (r) entre el tiempo de muestreo y los atributos ecológicos de la macrofauna edáfica con las propiedades físico-químicas del suelo, por profundidad del suelo, en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos.	51
Tabla 7.	Resumen de los efectos del análisis de varianza para la comparación entre tiempos de muestreo, utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.....	55
Tabla 8.	Correlación lineal de Pearson (r) y sus valores p entre los atributos ecológicos: densidad, riqueza y diversidad de familias de los macroinvertebrados del suelo y las variables edáficas en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos.....	56
Tabla 9.	Correlación (r) de los propiedades físico-químicas del suelo con los ejes del RDA, formado a través de la densidad de familias de la macrofauna del suelo de una sabana natural en los llanos venezolanos.	58
Tabla 10.	Densidad media ($\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$) de los ordenes y familias, y media de la densidad, riqueza y diversidad de las comunidades de los macroinvertebrados edáficos de una sabana natural (SN) y cobertura vegetal <i>Brachiaria dictyoneura</i> (Bd) y <i>Centrosema macrocarpum</i> (Cm), en la Estación Experimental La Iguana.....	63

Tabla 11. Resumen de los efectos del análisis de varianza de dos vías para la interacción entre factores "tiempos de muestreo" (Tiempo) y "cobertura vegetal" (COV), utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.....	71
Tabla 12. Correlación lineal de Pearson (r) y sus valores p entre las variables edáficas y los atributos ecológicos: riqueza y diversidad de familias de los macroinvertebrados edáficos de las coberturas vegetales SN, Bd y Cm, y la densidad media del agroecosistema en la estación La Iguana.....	77
Tabla 13. Correlación (r) de las propiedades físico-químicas del suelo con los ejes del RDA, formado a través de la densidad de las familias de los macroinvertebrados edáficos de un agroecosistema de sabana con cultivo de maíz asociado con coberturas vegetales en La Estación Experimental La Iguana.....	80
Tabla 14. Densidad media de las familias, y media de la densidad, riqueza y diversidad de las comunidades de los macroinvertebrados edáficos de los cultivos de maíz asociados con <i>Brachiaria dictyoneura</i> y <i>Centrosema macrocarpum</i> , con diferentes tratamientos de fertilización.....	88
Tabla 15. Resumen de los efectos del análisis de varianza de dos vías para la interacción entre factores "tiempos de muestreo" y "tratamiento de fertilización" para el cultivo de maíz asociado con la cobertura vegetal <i>Bd</i> y <i>Cm</i> , utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.....	90
Tabla 16. Resumen de los efectos del análisis de varianza de dos vías para la interacción entre factores "cobertura vegetal" (COV) y "tratamiento de fertilización" (TRAT), y entre los factores "tiempo de muestreo (Tiempo) y COV, utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.....	90
Tabla 17. Resumen de los efectos del análisis de varianza para la comparación entre tiempos de muestreo, utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.....	91
Tabla 18. Resumen de los efectos del análisis de varianza de dos vías para la interacción entre factores "período climático" (Período), "cobertura vegetal" (COV) y "tratamiento de fertilización" (TRAT), utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias	94

Tabla 19. Resumen de los efectos del análisis de varianza para la comparación entre tiempos de muestreo, utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.....	96
Tabla 20. Correlación lineal de Pearson entre las propiedades del suelo y los atributos ecológicos de la comunidad de macroinvertebrados edáficos de los cultivos de maíz asociados con <i>Bd</i> y <i>Cm</i> , con diferentes tratamientos de fertilización y la media en el agroecosistema en la Estación Experimental La Iguana.....	97
Tabla 21. Correlación (r) de las propiedades físico-químicas del suelo con los ejes del RDA, formado a través de la densidad de las familias de los macroinvertebrados edáficos de un agroecosistema de sabana con cultivo de maíz asociado con coberturas vegetales con diferentes tratamientos de fertilización.....	101
Tabla 22. Densidad media de familias de los macroinvertebrados edáficos por cobertura (SN: sabana natural y cultivo de maíz con <i>Bd</i> y <i>Cm</i>) y por tratamiento de fertilización. Se dan los totales de densidad, riqueza y diversidad de familias por cobertura vegetal y tratamiento	107
Tabla 23. Correlación (r) de las propiedades físico-químicas del suelo con los ejes del RDA, formado a través de la densidad de las familias de los macroinvertebrados edáficos de un agroecosistema de sabana con cultivo de maíz asociado con coberturas vegetales y sus tratamientos de fertilización.....	131

Índice de Figuras

	Página
Figura 1. Distribución de las sabanas en el mundo.....	1
Figura 2. Distribución de los tipos de vegetación en Venezuela. Sabanas en color mostaza.....	2
Figura 3. Parte de una sabana bien drenada. Guárico, Venezuela. Período seco. Coexistencia de gramíneas, arbustos y presencia de leñosas.....	4
Figura 4. Ganadería semi-extensiva con separación de potreros. Período seco. Sabanas de la Estación Experimental La Iguana, Guárico, Venezuela.....	6
Figura 5. Cárcava producida por erosión hídrica del suelo de sabana. Guárico, Venezuela	7
Figura 6. Residuos de la combinación de cultivo de maíz y de <i>Brachiaria dictyoneura</i> dejados sobre el suelo. Período seco. Sabanas de la Estación Experimental La Iguana, Guárico, Venezuela.....	8
Figura 7. Esquema de la relación intensidad de uso del suelo y su biodiversidad.....	9
Figura 8. Esquema de la distribución de tamaños de la biota del suelo.....	14
Figura 9. Evidencia de transporte de material entre capas del suelo por la macrofauna edáfica.....	16
Figura 10. Ubicación geográfica de la Estación Experimental La Iguana. Estado Guárico. Venezuela.....	27
Figura 11. Climograma de la estación biológica La Iguana. Guárico. Barras en azul: precipitación media total mensual en milímetros; línea continua: temperatura media mensual; línea punteada turquesa: temperatura media mínima y punteada rojo: temperatura media máxima.....	28
Figura 12. Distribución de las coberturas vegetales, tratamientos de fertilización y puntos de muestreo (seleccionados al azar en cada tiempo de muestreo) para los macroinvertebrados edáficos y suelo, en una sabana bien drenada del llano venezolano.....	32
Figura 13. Preparación de muestra compuesta de suelo. Estación Experimental La Iguana, Guárico. Venezuela.....	35

Figura 14. Extracción del monolito de suelo y representación de la unidad de muestreo	37
Figura 15. Trabajo de separación e identificación de la macrofauna. Instituto de Estudios Científicos y Tecnológicos de la UNESR. Venezuela.....	38
Figura 16. Muestreo de macroinvertebrados edáficos en sabana natural, en período de inicio de lluvias. Estación Experimental La Iguana, Guárico, Venezuela	39
Figura 17. Sabana natural en el área de estudio. Estación Experimental La Iguana, Guárico, Venezuela	45
Figura 18. Abundancia relativa (%) de los macroinvertebrados del suelo en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos por profundidad (0-5, 5-15 y 15-30 cm).....	49
Figura 19. Densidad, riqueza y diversidad de familias de los macroinvertebrados edáficos en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos, para cada tiempo de muestreo (T_x).....	54
Figura 20. RDA (ejes 1 y 2), correlacionando la densidad de familias de macroinvertebrados edáficos con las propiedades del suelo en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos. Círculo central indica valor mínimo de correlación ($r_s = 0,71$).....	57
Figura 21. RDA (ejes 1 y 3), correlacionando la densidad de familias de macroinvertebrados edáficos con las propiedades del suelo en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos. Círculo central indica valor mínimo de correlación ($r_s = 0,71$).....	59
Figura 22. Coberturas vegetales: <i>Brachiaria dictyoneura</i> y <i>Centrosema macrocarpum</i> en área de estudio.....	61
Figura 23. Diversidad de familias (N_1) de la comunidad de macroinvertebrados edáficos en cada cobertura vegetal (SN; Bd y Cm) en la Estación Experimental La Iguana.....	65
Figura 24. Abundancia relativa (%) de los ordenes de los macroinvertebrados edáficos por cobertura de vegetal: sabana natural, Bd y Cm la Estación Experimental La Iguana.....	67
Figura 25. Abundancia relativa (%) de los macroinvertebrados por profundidad del suelo (0-5, 5-15 y 15-30 cm), y por cobertura de vegetal: SN, Bd y Cm en la Estación Experimental La Iguana.....	69

Figura 26. Área de cultivo en época seca. Estación experimental La Iguana, Guárico. Venezuela	70
Figura 27. Densidad media de la comunidad de macroinvertebrados edáficos sin discriminar por coberturas, respecto tiempos de muestreo (parte superior); riqueza (parte media) y diversidad (parte inferior) de familias de los macroinvertebrados edáficos de una SN, Bd y Cm, por cada tiempo de muestreo.....	73
Figura 28. <i>Centrosema macrocarpum</i> y vástagos de maíz en área de cultivo en época seca (febrero). Estación Experimental La Iguana, Guárico, Venezuela	76
Figura 29. Ordenamiento de los sitios (SN, Bd y Cm, por tiempo de muestreo), según la densidad de familias de la macrofauna y su correlación con las propiedades del suelo, a través de un RDA. Parte superior: eje 1 y 2, parte inferior: eje 2 y 3.....	79
Figura 30. Ordenamiento de los sitios (SN, Bd y Cm, por tiempo de muestreo), según la densidad de familias de la macrofauna y su correlación con las propiedades del suelo, a través de un RDA (ejes 2 y 3).....	81
Figura 31. Cultivo de maíz y <i>B. dictyoneura</i> con dos tipos de fertilización. Lado izquierdo: sin fertilización, como control (BI0), y lado derecho de la imagen, fertilizado con roca fosfórica (BRF).....	84
Figura 32. Densidad relativa de los ordenes de los macroinvertebrados edáficos por cobertura de vegetal: cultivo de maíz asociado con Bd y Cm sus tratamientos de fertilización en la Estación Experimental La Iguana.....	86
Figura 33. Densidad, riqueza y diversidad de familias de los macroinvertebrados edáficos del agroecosistema maíz con coberturas de Bd y Cm y sus tratamientos de fertilización, en la Estación Experimental La Iguana, para cada tiempo de muestreo.	92
Figura 34. Densidad, riqueza y diversidad de familias de los macroinvertebrados edáficos del agroecosistema maíz con coberturas de Bd y Cm y sus diferentes tratamientos de fertilización, en la Estación Experimental La Iguana, para cada período climático.	95
Figura 35. Ordenamiento de los sitios (SN, Bd y Cm, con sus tratamientos de fertilización), según la densidad de familias de la macrofauna	

y su correlación con las propiedades del suelo, a través de un RDA (Ejes 1 y 2).....	100
Figura 36. Ordenamiento de los sitios (SN, Bd y Cm, con sus tratamientos de fertilización), según la densidad de familias de la macrofauna y su correlación con las propiedades del suelo, a través de un RDA (Ejes 2 y 3).....	104
Figura 37. Ordenamiento de los sitios (SN, Bd y Cm, con sus tratamientos de fertilización), según la densidad de familias de la macrofauna y su correlación con las propiedades del suelo, a través de un RDA (Ejes 1 y 2).....	112
Figura 38. Ordenamiento de los sitios (SN, Bd y Cm, con sus tratamientos de fertilización), según la densidad de familias de la macrofauna y su correlación con las propiedades del suelo, a través de un RDA (Ejes 1 y 3).	114
Figura 39. Esquema resumen del estudio de los macroinvertebrados edáficos en un manejo agroecológico en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos.....	117

1. Introducción

1.1. Las sabanas del llano central venezolano: características y desarrollo agrícola

La sabana es un ecosistema tropical y subtropical (figura 1) que se caracteriza por la dominancia de vegetación herbácea, gramíneas y ciperáceas, asociada o no a un componente arbóreo (Berroterán, 2000; Jiménez y Thomas, 2003; Sarmiento, 1984); es un ecosistema frágil, que si se gestiona inapropiadamente repercutiría en degradación de suelos y pasturas, pérdida de biodiversidad, de capacidad de retención de agua en el suelo, reducción de la productividad y aumento de emisiones de carbono (FAO, 2012).

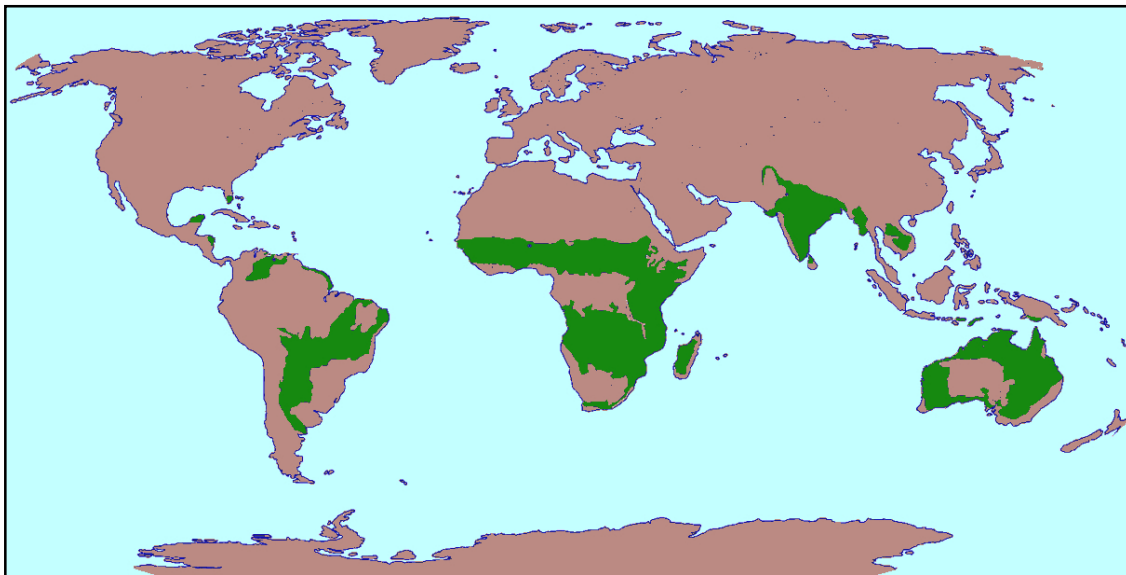


Figura 1. Distribución de las sabanas en el mundo (color verde). Modificado de Alcaraz (2012).

Como se muestra en la figura 1, las sabanas ocupan un espacio sustancial de la tierra, estimándose en un 20% de la superficie terrestre; de estas, el 45% corresponden a América del Sur. En Venezuela, la sabana se ubica principalmente en la región de los Llanos (planicie aluvial de baja altitud), alcanzando aproximadamente 30 millones de hectáreas (Rippstein et al., 2001) (figura 2).

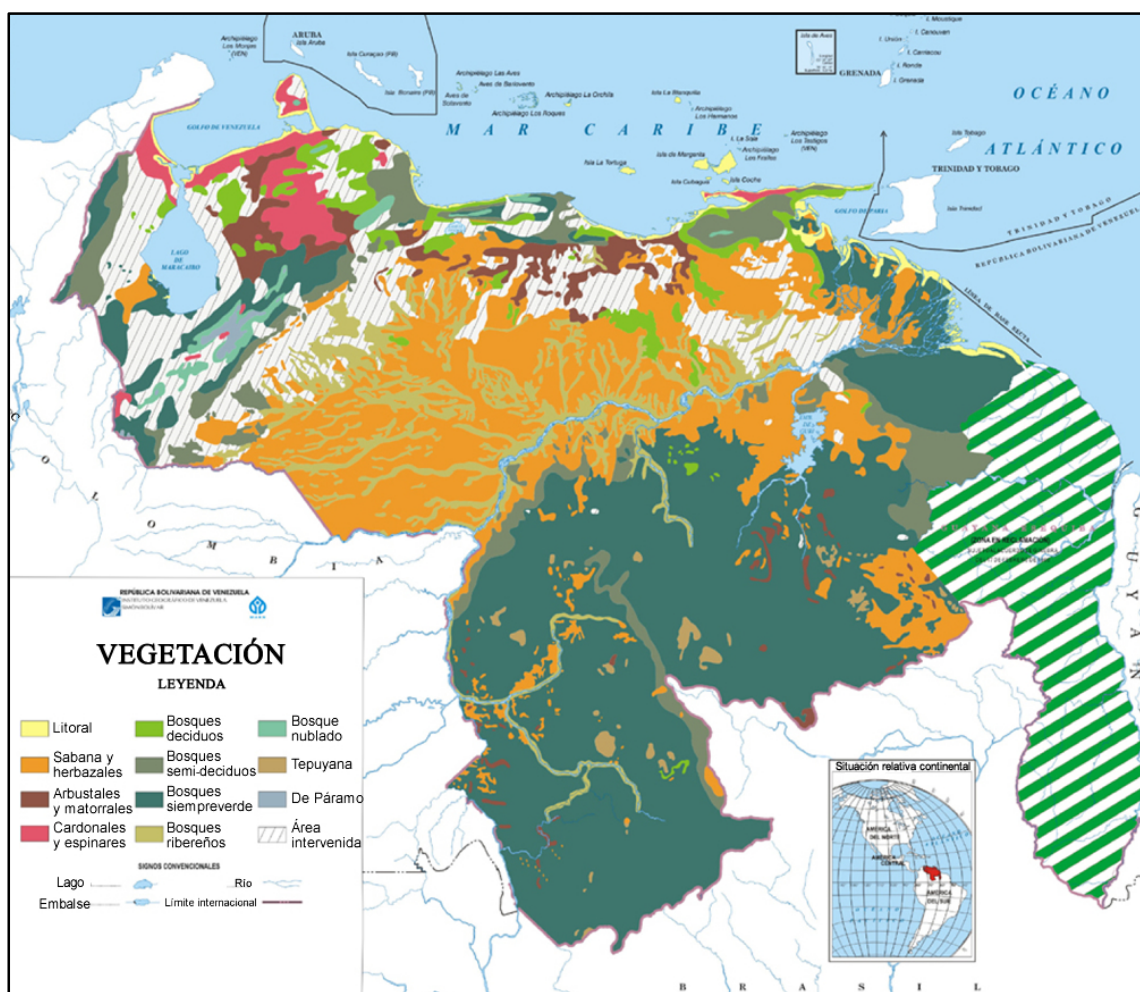


Figura 2. Distribución de los tipos de vegetación en Venezuela. Escala 1:2.000.000. Sabanas y herbazales en color mostaza. Fuente: Huber y Alarcón (1988).

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen (1900), la sabana tiene un clima tropical (As), caracterizado por una marcada estacionalidad pluviométrica anual: una lluviosa, concentrada en unos pocos meses, y otra seca; con temperaturas medias mensuales, siempre por encima de los 18°C (Foghin-Pillin, 2002).

Los suelos, a excepción de los de piedemonte, por lo general tienen baja fertilidad con poca retención de agua (Montilla, 2010). No obstante, presenta una biodiversidad relativamente alta, aunque menor a las selvas, con una elevada variedad de formas de vida (figura 3) y diversidad de estrategias fenológicas, adaptadas a los factores restrictivos del ambiente, como sequía y el fuego (Sarmiento, 1996). Además, posee gran potencialidad para actividades agropecuarias (Rippstein et al., 2001).

Las sabanas de los llanos centrales venezolanos, se caracterizan por ser bien drenadas y, actualmente, constituyen uno de los principales espacios de desarrollo de actividades productivas del país. El cultivo de cereal, así como la ganadería bovina extensiva y, una más intensiva, asociada a estos cultivos, constituyen las principales actividades agropecuarias de la región (Lopez-Hernández, 1995).



Figura 3. Parte de una sabana bien drenada. Guárico, Venezuela. Período seco. Coexistencia de gramíneas, arbustos y presencia de leñosas.

No obstante, las condiciones climáticas y edáficas de estas sabanas han limitado su uso a una ganadería extensiva, aprovechando los pastizales naturales de muy poca calidad nutricional (Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002), dada la baja fertilidad de estos suelos, que además los hacen poco favorables para los cultivos (Berroterán, 2000; Lozano et al., 2010a), ya que son altamente meteorizados, ácidos, con altos contenidos de sexquióxidos de hierro y aluminio, alta saturación de aluminio intercambiable, bajos contenidos de materia orgánica y de nutrientes (especialmente nitrógeno

y fósforo disponibles) (Hernández-Hernández, 2008; Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002). Por otro lado, los suelos de las sabanas bien drenadas, poseen una textura gruesa, que favorece el movimiento del agua a través de estos y limita la retención de humedad (Hernández-Hernández, 2008).

El desarrollo agronómico en esta región, fue posible a partir de la segunda mitad del siglo XX, cuando se facilita la entrada de insumos químicos y mecánicos, con un esquema de producción más tecnificado. Así se pudieron cultivar con excedentes, grandes extensiones de cereales, principalmente arroz, soya, maíz (López-Hernández et al., 2005). También, se introdujo especies de pastos africanos, principalmente *Brachiaria* sp. y *Andropogon* sp., más nutritivos para el ganado (Pizarro et al., 1996) que pudieron mejorar la oferta de forraje de mayor calidad nutricional para el ganado vacuno (figura 4). Posteriormente, en la primera década del siglo XXI, las actividades agropecuarias se ampliaron e intensificaron aún más; los cultivos de cereales (arroz y maíz) en la sabana de los llanos centrales venezolanos, registraron un incremento de más del 68% (de 620869 a 1043291) de hectáreas cultivadas (Gutiérrez y Ordoñez, 2011).

Esta tecnificación y entrada, cada vez mayor, de insumos externos para la agricultura y ganadería en esta sabana, bajo un manejo convencional, elevó los niveles de producción de los cultivos, de los pastos introducidos y con estos, de la ganadería (Hernández-Hernández, 2008; López-Hernández et al., 2005).



Figura 4. Ganadería semi-intensiva con separación de potreros. Período seco. Sabanas de la Estación Experimental La Iguana, Guárico, Venezuela.

No obstante, varios trabajos confirman que paulatinamente la producción de los agroecosistemas de estas sabanas ha venido en descenso (Castro, 2016; López-Hernández et al., 2005), producto de la compactación y erosión del suelo (figura 5) y la disminución de su materia orgánica (López-Hernández et al., 2005). Lo que aunado a los factores climáticos, con patrones contrastantes de marcada sequía y fuertes y erráticas lluvias (Hernández-Hernández et al., 2011), además de las quemadas anuales de los pastos, han contribuido al deterioro paulatino de los suelos y a un incremento de las

emisiones de CO₂ a la atmósfera (de Wit et al., 1995; López-Hernández et al., 2005; Pla, 1990; Pla et al., 1981).



Figura 5. Cárcava producida por erosión hídrica del suelo de sabana. Guárico, Venezuela. Foto: Hernández-Hernández, RM.

Este deterioro ambiental, generado por el desarrollo socio-económico, plantea uno de los retos más importantes de la sociedad actual: cubrir sus necesidades nutricionales, preservando, al mismo tiempo, las capacidades de producción de los agroecosistemas para las futuras generaciones. Por lo tanto, es necesario la implementación de prácticas más conservacionistas, orientadas principalmente, a una mínima o cero labranza y un adecuado manejo de residuos sobre el suelo de cultivo o de coberturas asociadas a dicho cultivo

(López-Hernández et al., 2005), que no sólo conserven sus características abióticas y bióticas del pre-cultivo, sino que puedan mejorarlas o recuperarlas de una degradación previa (Bedano et al., 2016; Busari et al., 2015; Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002; Palm et al., 2014).

1.2. Manejo conservacionista del suelo



Figura 6. Ejemplo de un manejo conservacionista. Residuos de la combinación de cultivo de maíz y de *Brachiaria dictyoneura* dejados sobre el suelo. Período seco. Sabanas de la Estación Experimental La Iguana, Guárico, Venezuela.

Foto: Hernández-Hernández, RM.

Las prácticas conservacionistas se caracterizan por reducir drásticamente la labranza del suelo, usando entre una labranza de conservación (o mínima labranza), una labranza cero o una rotación de éstas (FAO, 1992), con siembra directa de las plantas de cultivo, y como se muestra

en la figura 6, dejando como mínimo un 30% de cobertura vegetal viva o muerta (residuos postcosecha) sobre el suelo de cultivo (FAO, 1992; López-Hernández et al., 2005; Palm et al., 2014). Otras prácticas agropecuarias, consideradas como conservacionistas, son la rotación de cultivos (Giller et al., 2015) y la combinación de dos o más tipos de plantas de cultivo en una misma parcela (Li et al., 2001), ya que tenderían a aumentar la biodiversidad, respecto a monocultivos y demás prácticas convencionales (figura 7) (Bedano et al., 2016; Bottinelli et al., 2015; Gliessman-Stephen, 2002; Scopel et al., 2013; Tao et al., 2016).

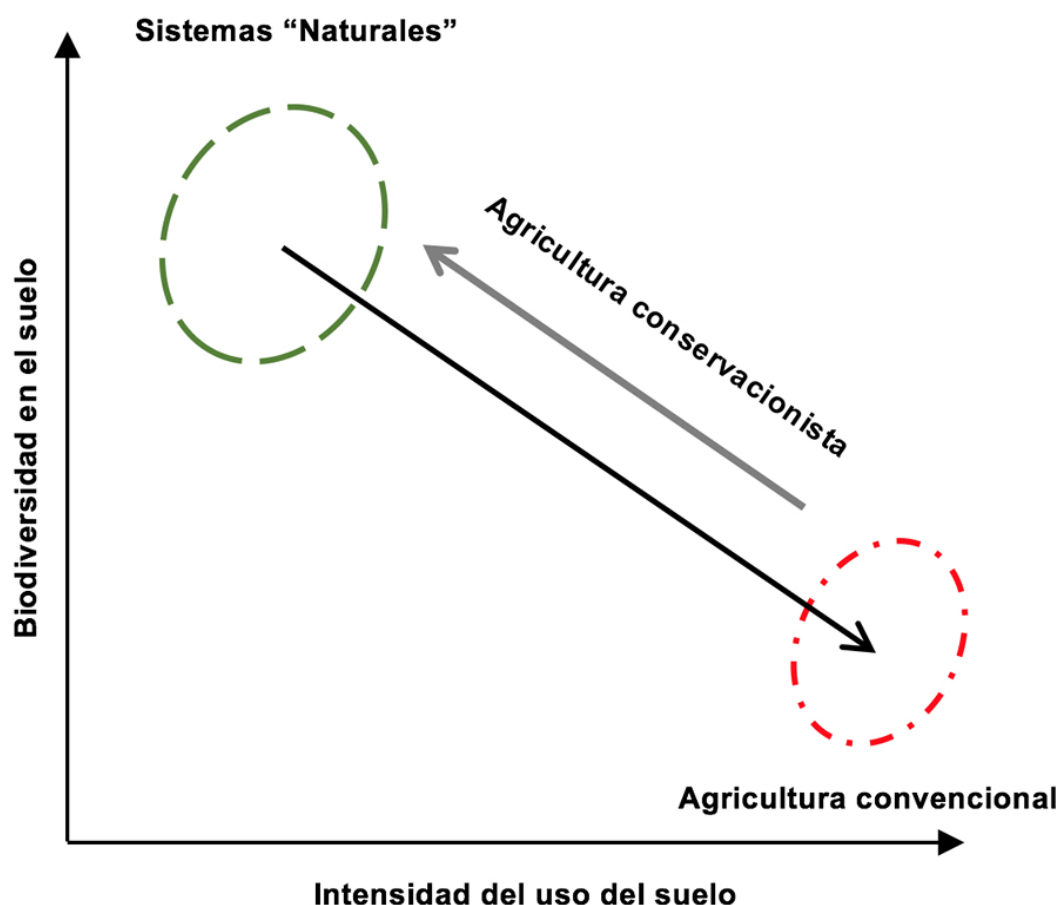


Figura 7. Esquema de la relación entre intensidad de uso del suelo y su biodiversidad. Modificado de Bottinelli et al. (2015).

En este sentido, Bottinelli et al. (2015) presentan el esquema de la figura 7, donde se representa la relación entre la intensidad del uso del suelo y la biodiversidad edáfica. Estos autores, indican que la agricultura de conservación “...se basa en el desarrollo de la biodiversidad en el suelo...”.

Las prácticas conservacionistas en la agricultura, apuntan a aumentar el rendimiento de los cultivos, mediante la mejora de ciertas condiciones del suelo que redundaría en favorecer varios servicios ecosistémicos, como, por ejemplo, sumidero de carbono, conservación de la biodiversidad, disponibilidad de agua en calidad y cantidad, control de plagas, polinización, entre otros (Palm et al., 2014).

Este manejo conservacionista del suelo, podría mejorar su estructura y estabilidad de sus agregados (Zhang et al., 2017), aumentar los contenidos de materia orgánica, la infiltración y la retención de agua e incrementar la cantidad de nutrientes, reduciendo, al mismo tiempo, la erosión del suelo (Rusu, 2014; Shao et al., 2016) y los extremos de las variaciones de temperatura edáfica (Shaxson y Barber, 2005). Esto aumentaría la productividad del suelo (Mitchell et al., 2017) y favorecería el secuestro de carbono, mientras reduce las emisiones de CO₂ a la atmósfera, tanto por una menor oxidación del carbono orgánico del suelo, como por un menor consumo de combustibles fósiles (Acevedo y Martínez, 2003; Bayer et al., 2016; Busari et al., 2015). Por otro lado, desde el punto de vista económico, los agricultores se beneficiarían directamente, con ingresos cada vez mayores, que aunado al ahorro de tiempo

y trabajo, mejoraría su nivel de vida familiar (Peiretti y Dumanski, 2014; Shaxson y Barber, 2005).

En el escenario de las sabanas bien drenadas de los llanos centrales de Venezuela, el manejo conservacionista del suelo, junto a un sistema de cultivos mixtos, como la asociación de cereales con pastos introducidos y/o leguminosas forrajeras perennes, pudiera ser una opción viable para el mejoramiento de los suelos, y a la vez una mejor oferta forrajera para el ganado. Esto redundaría en un beneficio para el productor, por cubrir parte de los costos nutricionales del mantenimiento del ganado, además, en el caso de la leguminosa, fijadora natural de nitrógeno, por su potencialidad para aumentar la fertilidad de los suelos, lo que a la larga podría aumentar la productividad de los cultivos (Castro, 2016).

Sin embargo, no todas las técnicas o prácticas conservacionistas generarían resultados esperados en todos los ambientes por igual, pues depende de las características del cultivo y factores ambientales y sociales; algunos resultados, incluso, pudieran ser contrarios. Al respecto, Giller et al. (2015), encuentran que, en los últimos 10 años, la adopción de la agricultura de conservación por parte de pequeños agricultores en el subtrópico, algunas veces han generado resultados decepcionantes, aseverando que estas evidencias cuestionan las afirmaciones de que la agricultura de conservación siempre incrementa los rendimientos de los cultivos y acumula carbono en el suelo, aunque reconoce que es evidente el aumento de la estabilidad en los rendimientos de los cultivos en climas secos.

En este sentido, Domínguez et al. (2010) encontraron que para un suelo Typic Haplustolls de la provincia de Córdoba, Argentina, el manejo agrícola conservacionista con cero arados, generó, en el suelo, aumento densidad aparente, mientras disminuyó su materia orgánica y pH. Por otro lado, Mhazo et al. (2016), indican que la labranza cero tiene un mayor potencial para reducir la erosión en regiones templadas, con suelos más jóvenes y menos estructurados que en las regiones tropicales, con suelos más evolucionados y estructurados. Así mismo, Busari et al. (2015), argumentan que mientras los cultivos con labranza cero, por lo general, tienden a ser más amigables con el ambiente que los de mínima labranza, estos últimos tienen un mínimo impacto ambiental, con mejores rendimientos. Palm et al. (2014), por su parte, revelan que existen resultados inconsistentes, respecto a los servicios ecosistémicos de la agricultura conservacionista, explicado por la multiplicidad de factores ambientales y características propias de cada cultivo.

Todo ello sugiere que, para alcanzar los resultados esperados en una actividad agrícola con manejo conservacionista del suelo, se debe implementar tomando en cuenta el tipo de paisaje, tipo de suelo, clima, topografía, drenaje y características del cultivo, así como las condiciones socioeconómicas del agricultor (FAO, 1992; Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002; Palm et al., 2014). Pues, los métodos o técnicas implementadas para un cultivo en una determinada región con resultados favorables, puede no resultar así para otra región y/o cultivo diferente.

Al respecto, Decaëns et al. (2001) y Paul et al. (2015), afirman que cada agroecosistema tiene condiciones espaciales y temporales propias, para los que se deben aplicar técnicas de manejo adecuadas a sus características ecológicas, sociales y económicas. Esto demanda el conocimiento y la comprensión ecológica de cada ambiente, para garantizar estrategias sustentables de producción y al mismo tiempo conservar la biodiversidad. Se requiere entonces de diferentes áreas del conocimiento, tomando en cuenta todos los factores ambientales naturales y antrópicos que convergen en el agroecosistema (Jeffries y Barea, 1994).

1.3. Macroinvertebrados edáficos y su importancia ecológica

Dentro de los factores naturales, la biota del suelo es un componente de gran importancia ecológica, su diversidad puede incluir representantes de todos los *phyla* terrestres, con gran variedad de funciones ecológicas, tamaños y tipos de organización biológica (Jiménez, 2009; Lavelle et al., 1993; Odum y Sarmiento, 1998). Dentro de estos, los invertebrados del suelo son el grupo más dominante de la biota edáfica, en cuanto a abundancia y diversidad se refiere, pudiéndose clasificar según su tamaño en micro, los menores a 0,1mm, meso entre 0,1 y 2 mm y macroinvertebrados, los mayores a 2 mm (figura 8) (Swift et al., 1979).

La alta biodiversidad de invertebrados en el suelo, se puede deber a: i) la especialización trófica: los diferentes organismos se alimentan de una gran variedad de recursos tróficos, como por ejemplo, materia orgánica en diferentes

estados de descomposición que permiten una gran coexistencia de detritívoros que a su vez son presa de una variedad de depredadores, entre otros; ii) que las poblaciones de estas especies se encuentran en permanente variación de densidad dadas las condiciones y limitantes del suelo, a veces adversas, de tal modo que rara vez alcanzan una densidad a la que ocurre competencia por los recursos alimenticios; iii) las características del suelo y su estructura tridimensional proporciona una variedad de espacios y nichos, originando una segregación de especies importante (Jiménez, 2009).

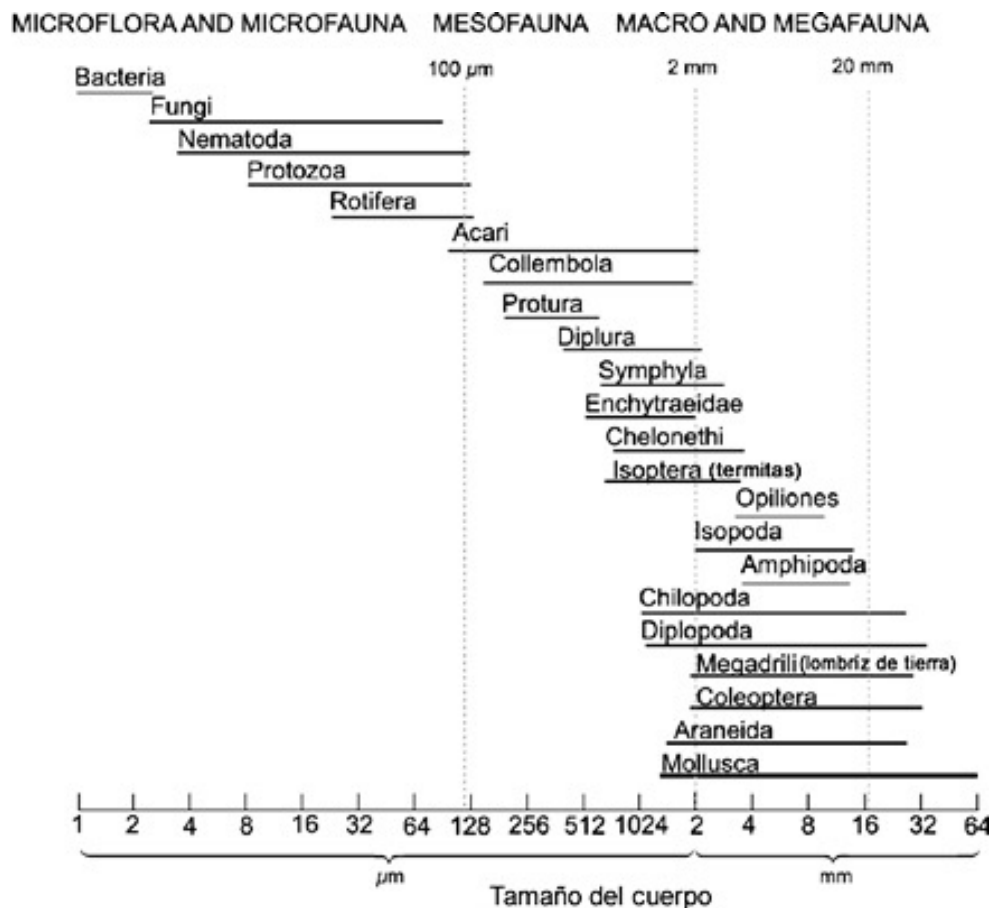


Figura 8. Esquema de la distribución de tamaños de la biota del suelo. Modificado de Swift et al. (1979).

Paul et al. (2015), sugieren conocer la biota del suelo, especialmente los macroinvertebrados edáficos, para aprovechar los beneficios que estos pueden dar en el manejo conservacionista del suelo, garantizando así la mayor biodiversidad posible y, por otro lado, detectar especies que pudieran ser plagas potenciales.

Desde hace más de un siglo, los científicos han reconocido las bondades de los macroinvertebrados del suelo. Charles Darwin (1881), por ejemplo, fue el primero en revelar el papel de las lombrices de tierra en el proceso de mineralización y transformación de la necromasa, además, uno de los primeros en reconocer las funciones biológicas del suelo (Feller et al., 2003). Más recientemente, varios investigadores han demostrado, el rol de la macrofauna edáfica en el funcionamiento del ecosistema, específicamente en la pedogénesis y en la fertilidad del suelo (Bottinelli et al., 2015; Lavelle et al., 2006; Moura et al., 2015; Rendón et al., 2011). Por un lado, por su efecto en la formación y estabilización de la estructura del suelo (Bottinelli et al., 2015; Lavelle et al., 2006) y, por el otro, por ser el primer eslabón en el procesamiento de materia orgánica estructurada o gruesa, así como el principal transportador de material de la superficie a horizontes más profundos y viceversa (figura 9), lo que supondría un papel preponderante en el ciclo de nutrientes, influenciando la dinámica energética del sistema (Coleman y Hendrix, 2000; Rendón et al., 2011; Ruiter et al., 1997). Además, con un creciente interés agronómico desde las últimas décadas, se ha reconocido su importancia como controladores biológicos de plagas (Eckschmitt et al., 1997).



Figura 9. Evidencia de transporte de material entre capas del suelo por la macrofauna edáfica. Área de estudio. Estación experimental La Iguana. Guárico, Venezuela.

Por otro lado, Lavelle et al. (1997), relacionó la biodiversidad en el suelo con la fertilidad a largo plazo de éste. La conformación y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres (sobre el suelo), así como sus respuestas ecológicas y evolutivas al cambio, se han atribuido a la gran diversidad de organismos del

suelo (Bardgett y van der Putten, 2014), por lo que se ha sugerido una interdependencia entre la biodiversidad sobre el suelo con la existente dentro de éste (Gillison et al., 2003).

1.4. Respuesta de la macrofauna edáfica a la alteración del suelo

Como se ha referido hasta ahora, los macroinvertebrados edáficos tienen una alta incidencia sobre el componente abiótico y biótico de los ecosistemas, pero esta influencia es recíproca, pues estos componentes también afectan la macrofauna del suelo, lo que indica una estrecha relación entre estos. Es de suponer entonces, que los macroinvertebrados edáficos sean sensibles a variaciones espacio-temporales de las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo (Berg y Bengtsson, 2007; Gholami et al., 2016; Jiménez et al., 2014; Wu et al., 2012), así como a las variaciones meteorológicas diarias o anuales (Brussaard et al., 2007).

Wardle (2006), analizó los factores biológicos que influyen en la diversidad de la comunidad dentro de los principales grupos de organismos del suelo, a través de escalas espaciales. Así, sugiere que, a una escala local (dentro del suelo 100x100x30 cm, por ejemplo), la biodiversidad del suelo puede verse afectada por interacciones intra y/o entre niveles tróficos. Dentro del suelo, las diferencias morfo-funcionales también pueden influir en la diversidad de organismos, los invertebrados de mayor tamaño influyen sobre los de menor tamaño, promoviendo la dispersión y modificando propiedades del suelo, en especial su estructura. A escalas más grandes (parcela o 1 ha,

por ejemplo), los efectos individuales de las especies vegetales, su composición y diversidad taxonómica, su composición química estructural (biomasa con contenidos de compuestos carbonados simples o complejos), la mezcla de tipos de hojarasca y las interacciones tróficas subterráneas, repercuten en la biodiversidad del suelo. Además, en la escala del paisaje, la diversidad en el suelo también responde a los cambios naturales de la vegetación, a la sucesión ecológica y/o a los cambios inducidos antropológicamente, a través de establecimientos residenciales, cultivos o introducción de especies ornamentales.

Sin embargo, el tipo o intensidad del manejo tiene un efecto diferencial entre los diferentes taxa del componente biótico, beneficiándolos o perjudicándolos, dependiendo de sus límites de tolerancia, estrategias de vida, entre otros (Flohre et al., 2011). Respecto al manejo del suelo se ha documentado que la respuesta de la macrofauna edáfica ante el efecto del cambio de las condiciones naturales por las prácticas agrícolas, puede depender de la riqueza y de la diversidad relativa inicial de los campos bajo cultivo, así como de la intensidad, modo o práctica y frecuencia del manejo durante el desarrollo agropecuario (Eckschmitt et al., 1997).

En un manejo agrícola convencional, el monocultivo erosiona la diversidad biológica, disminuyendo sus funciones ecosistémicas (Bedano et al., 2016; Bottinelli et al., 2015; Tao et al., 2016); además la labranza y el uso de insumos externos al agroecosistema es intensa, deteriorando la estructura y química del suelo, lo que generaría pérdida de refugios, desecación,

perturbación permanente y alteraciones en el intercambio gaseoso e infiltración de agua, así como la alteración en la concentración de nutrientes, convirtiendo algunos compuestos en elementos tóxicos para los invertebrados. Por otro lado, el uso de plaguicidas químicos tiene un fuerte impacto en la biota edáfica. Todo esto se traduce en descensos de la abundancia, disminución de riqueza específica, así como de su diversidad taxonómica y funcional (Geiger et al., 2010; Lavelle et al., 1993; Pelosi et al., 2014; Wolters y Eckschmitt, 1997).

Contrariamente, se ha señalado que el manejo conservacionista del suelo, que entre otras prácticas están: la mínima o cero labranza, manejo de residuos vegetales sobre el suelo, asociación de cultivos, rotación de cultivos, uso de biofertilizantes; generan un aumento en la variedad y disponibilidad de recursos y en la heterogeneidad microespacial del suelo, nichos ecológicos y una mayor estabilidad en el tiempo (Geiger et al., 2010; Jiménez et al., 2003; Sanabria et al., 2014), lo que favorece el aumento de abundancia, la riqueza y la biodiversidad taxonómica y funcional de los macroinvertebrados del suelo (Araujo y López-Hernández, 1999; Bedano et al., 2016; Bottinelli et al., 2015; Ernst y Emmerling, 2009; Gizzi et al., 2009; Jiménez, 2009; López-Hernández y Ojeda, 1996), lo que además, se correspondería con una disminución cada vez más efectiva en la ocurrencia de plagas en el agroecosistema (Quintanilla-Tornel et al., 2016; Third World Network y SOCLA, 2015).

Esta relación ha propiciado un interés cada vez mayor en conocer la biología y ecología de los macroinvertebrados del suelo y su función (Decaëns et al., 2006; Nahmani et al., 2006; Swift, 2003), pues este conocimiento se

puede aplicar en varias áreas, por ejemplo, en estudios de impacto ambiental, como indicadores biológicos (Havlicek, 2012; Lavelle et al., 2009; Rousseau et al., 2013; Santorufo et al., 2012); restauración de suelos degradados, dado su papel dinamizador en el ciclo de nutrientes (Jouquet et al., 2014; Snyder y Hendrix, 2008); o controladores biológicos de plagas (Eckschmitt et al., 1997).

En estudios y propuestas agroecológicas, se les ha dado cada vez más importancia, ya que se quiere tomar ventaja de sus funciones para reducir impactos tanto en la física como en la química del suelo, que a la larga se pueden traducir en aumentos de la productividad del agroecosistema de una manera sustentable. También, para tratar de conservar el estado natural del suelo (en cuanto a fertilidad) y/o, incluso, para mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas y, con ello, su fertilidad integral (Anderson, 1988; Bottinelli et al., 2015; Moura et al., 2015). Moghimian et al. (2013), por ejemplo, destaca el papel de los macroinvertebrados edáficos en el desarrollo sucesional de los ecosistemas terrestres y la recuperación de bosques degradados.

1.5. Los macroinvertebrados del suelo como indicadores de la calidad del suelo

La calidad del suelo, definida como un complemento entre su salud y su capacidad para funcionar dentro de un ambiente natural o manejado para sostener la productividad biológica y mantener la calidad ambiental (Doran et al., 1994; Jiménez y González-Quiñones, 2006; Karlen et al., 1997), se ha

evaluado, cada vez más, con el uso de la macrofauna edáfica como indicadora (Bedano et al., 2016; Cabrera, 2012; Santorufo et al., 2012). Esto se debe, por un lado, a su alta sensibilidad frente a alteraciones ambientales (Lavelle et al., 1994; Morales y Sarmiento, 2002; Rendón et al., 2011) y, por otro lado, a que pueden indicar una multiplicidad de variables ambientales que convergen en ellos, dando no solo un valor puntual en el momento de su medición, sino también su respuesta a las condiciones previas del ambiente (por ejemplo, historia de uso) (Muñoz-Riveaux et al., 2003).

Adicionalmente, el uso de los macroinvertebrados del suelo como indicadores de la calidad edáfica y del ambiente en general, ofrece ventajas frente al uso de otros organismos (ejemplo vertebrados), por su diversificación taxonómica y ecológica, sus hábitos relativamente sedentarios, presencia en el suelo a lo largo del año, la relativa facilidad para su muestreo e identificación, hasta el nivel taxonómico de orden y separación en morfotipos, su corto ciclo de vida que permite una rápida respuesta a la alteración ambiental y su alta capacidad reproductiva, que posibilitan muestreos sin que estos alteren considerablemente la comunidad (Cabrera, 2012).

Dentro de los atributos ecológicos de los macroinvertebrados edáficos más usados para indicar la calidad del suelo, están: la densidad y diversidad (Lavelle et al., 1994), la biomasa, riqueza y composición funcional (Cabrera, 2012; Stork y Eggleton, 1992). Algunos de estos atributos se han combinado de diferentes maneras, para generar índices que pueden tomar en cuenta rasgos eco-morfológicos (dependientes de la presencia/ausencia de especies)

y rasgos eco-funcionales (dependientes de la diversidad taxonómica y sus características funcionales) (Santorufu et al., 2012; Yan et al., 2012).

Además, dado que en una comunidad de macroinvertebrados edáficos, los diferentes taxa que la componen pueden afectarse de formas distintas ante un mismo estímulo ambiental (Martín Cano et al., 1995), se ha propuesto también índices basados en grupos taxonómicos de la macrofauna edáfica, por ejemplo, la relación lombrices de tierra:termitas, que por sus características opuestas ante ciertas características ambientales (las lombrices de tierra (orden Haplotaxida), asociadas a ambientes sin o con poca intervención y las termitas (orden Isoptera), a ambientes con diferentes grados de alteración), podrían ser un indicador sensible de la calidad del suelo (Barros et al., 2002; Decaëns et al., 2003b; Lavelle et al., 1993).

No obstante, se debe tener en cuenta que ningún indicador tiene aplicación universal, por lo que se requiere de diferentes indicadores (bióticos y abióticos) para diferentes funciones y condiciones ambientales (Pulleman et al., 2012). Por otro lado, a nivel mundial, no ha sido posible el uso estandarizado de algún índice indicador propuesto hasta el momento, ni cuáles son los valores críticos que deben dar para señalar un proceso de deterioro de un suelo particular (Jiménez y González-Quñones, 2006); en parte, debido a la diversidad taxonómica, a la gran diversidad ambiental y, sobre todo, a las diferentes respuestas que pueden dar los organismos del suelo a alteraciones de su hábitat (Yan et al., 2012); por lo que, para la selección o generación de algún método o índice indicador basado en los macroinvertebrados del suelo,

se sugeriría el uso de criterios más localizados y más puntuales en el tiempo, y contextualizados a las condiciones ambientales de un área determinada.

1.6. Estudios de los macroinvertebrados edáficos en el neotrópico

Lo referido hasta el momento, manifiesta la importancia que tienen los macroinvertebrados del suelo en la biodiversidad global, sus beneficios a ecosistemas y agroecosistemas, en estudios de diferentes áreas del conocimiento y su aplicación. Sin embargo, los organismos del suelo no han tenido el mismo tratamiento que los organismos sobre el suelo (Decaëns, 2010), permaneciendo como un componente poco comprendido de los ecosistemas terrestres (Ruiz et al., 2008).

Existe una escasez de información sobre los patrones espaciales y temporales de la biodiversidad del suelo, lo que dificulta el desarrollo de estudios meta-analíticos o de nuevos modelos que expliquen la estructuración de las comunidades del suelo; así como de los roles relativos de la genética, las especies, las comunidades que conforman y la diversidad funcional en un ecosistema. También, esta limitación de información restringe la comprensión del papel de los factores extrínsecos, como las variaciones en la fertilidad del suelo y la complejidad estructural del suelo, en la modulación de las relaciones de la biodiversidad (Bardgett y van der Putten, 2014).

En el neotrópico, debido a la gran diversidad climática, ecosistémica, y social, sigue siendo aún más escasa la información taxonómica, biológica

(López-Hernández, 2003) y ecológica, por ejemplo: distribución espacial y factores que lo determinan (Jiménez et al., 2006), así como su respuesta a las perturbaciones edáficas (Giller et al., 2009). Esto a pesar de los estudios desarrollados y apoyados por instituciones como el Centro Internacional de Agricultura Tropical y Universidades e Institutos de investigación en diferentes países de la región.

De los estudios sobre ecología de los macroinvertebrados edáficos, desarrollados en ambientes de sabanas neotropicales, se puede extraer que las comunidades de estos organismos están conformadas principalmente por especies pertenecientes a los órdenes Isoptera (termitas), Hymenoptera (hormigas), Coleoptera y Haplotáxida (lombrices de tierra) (Benito et al., 2005; Cabrera et al., 2011; de Aquino et al., 2008; Domínguez et al., 2010; Liu et al., 2011); los cuales poseen un patrón de variación vertical y temporal que depende principalmente de las condiciones climáticas (temperatura y humedad) (Araújo et al., 2010), por ejemplo, se ha demostrado que algunos grupos de macroinvertebrados edáficos tienden a permanecer en profundidades de 10 a 30 cm (más aun en época de sequía), donde las condiciones edafoclimáticas se mantienen relativamente constantes, respecto a las encontradas en la superficie del suelo (Lavelle, 1983a). Por otro lado, su distribución horizontal, en general es gregaria, generando puntos “calientes” de mayor actividad biológica (Decaëns, 2010; Ettema, C y Wardle, 2002; Jouquet et al., 2006). Esta distribución se ve influenciada por el tipo de cobertura vegetal, los mosaicos generados por ésta y los micro-relieves del suelo (Lavelle, 1983b).

2. Objetivos

El objetivo fundamental de la presente tesis doctoral es abordar el conocimiento de los macroinvertebrados edáficos en una sabana bien drenada, en cuanto a su composición y estructura ecológica, tanto en su ambiente natural como en una sabana intervenida, evaluando dentro de éstas, el efecto de un manejo agrícola conservacionista, con unidades de producción cereal-ganado, su variación en el tiempo y por períodos climáticos. Para lo cual se planteó:

- 2.1. Describir la comunidad de macroinvertebrados del suelo en una sabana natural de Llanos venezolanos, utilizando sus atributos ecológicos como la densidad, riqueza y diversidad de familias;
- 2.2. Analizar la variación temporal de estos atributos ecológicos, en general y en profundidad;
- 2.3. Determinar relaciones entre las propiedades del suelo y los macroinvertebrados edáficos que pudieran explicar las variaciones temporales.
- 2.4. Determinar los efectos del establecimiento de cultivos conservacionistas de maíz (*Zea mays* ssp., Linneo), asociado con *Brachiaria dictyoneura* (Figari & De Not.) y con *Centrosema macrocarpum* (Benth.), sobre la estructura y atributos ecológicos de

la macrofauna del suelo, evaluando posibles diferencias entre las comunidades presentes en suelos de sabana natural y de parcelas cultivadas, por profundidad y en el gradiente temporal.

2.5. Identificar las relaciones entre las propiedades físico-químicas del suelo y los macroinvertebrados edáficos que pudieran explicar estas diferencias.

2.6. Evaluar el efecto sobre las comunidades de macroinvertebrados edáficos de distintos tratamientos de fertilización de los cultivos, a través de la comparación de su estructura y atributos ecológicos en los diferentes tratamientos, considerando la variación temporal y analizando posibles relaciones con las propiedades físico-químicas del suelo.

2.7. Evaluar la potencialidad del uso de los macroinvertebrados edáficos como indicadores de la calidad del suelo, y algunos atributos ecológicos de estos, a través de la presencia/ausencia de familias y/o de las variaciones en sus densidades y del uso de algunos índices indicadores basados en la macrofauna del suelo.

3. Materiales y Métodos

3.1. Descripción del área de estudio

El estudio se desarrolló en la Estación Experimental La Iguana, ubicada geográficamente en $8,3916^{\circ}$ y $8,475^{\circ}$ N y $65,4675^{\circ}$ y $65,3805^{\circ}$ W, en las sabanas del sureste del estado Guárico, Venezuela (figura 9), entre 80-120 metros sobre el nivel del mar.

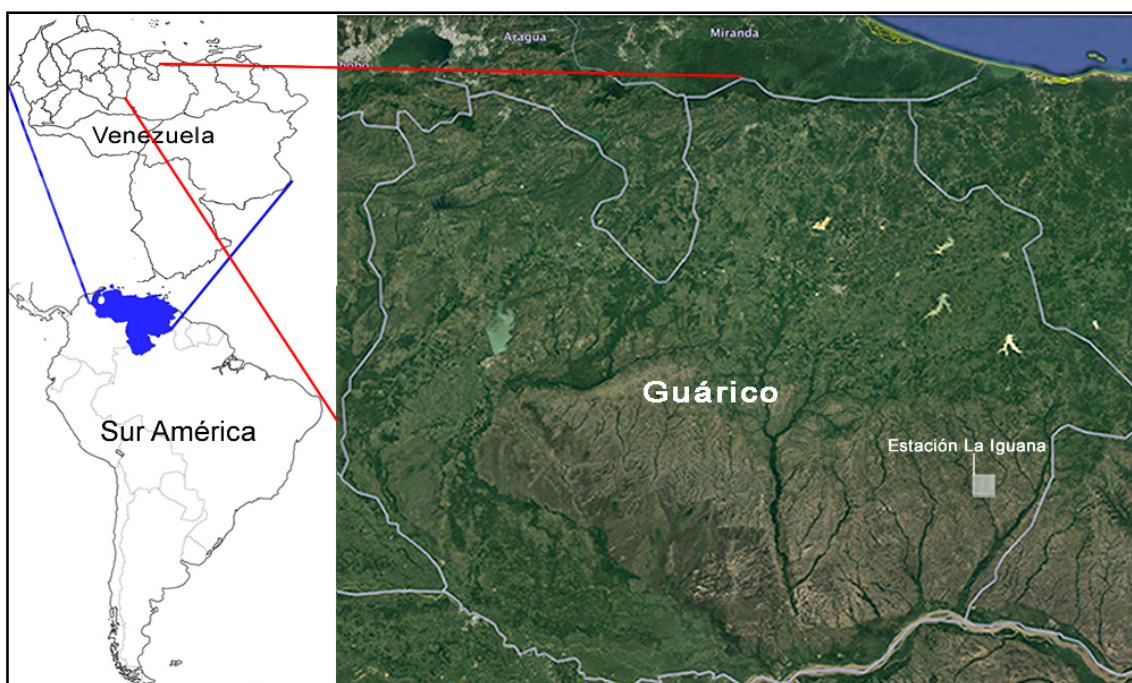


Figura 10. Ubicación geográfica de la Estación Experimental La Iguana. Estado Guárico. Venezuela. Imagen satelital: Google Inc. (2017).

El clima está marcado por un período seco bien diferenciado de diciembre a mayo (inclusive) y un período lluvioso entre junio y noviembre, con una precipitación media anual de 1369 mm; temperatura media mensual de

27,3°C, máxima media de 33,4 °C y mínima media de 23,2 °C (figura 11)
(Hernández et al., 2011; Lozano et al., 2010b).

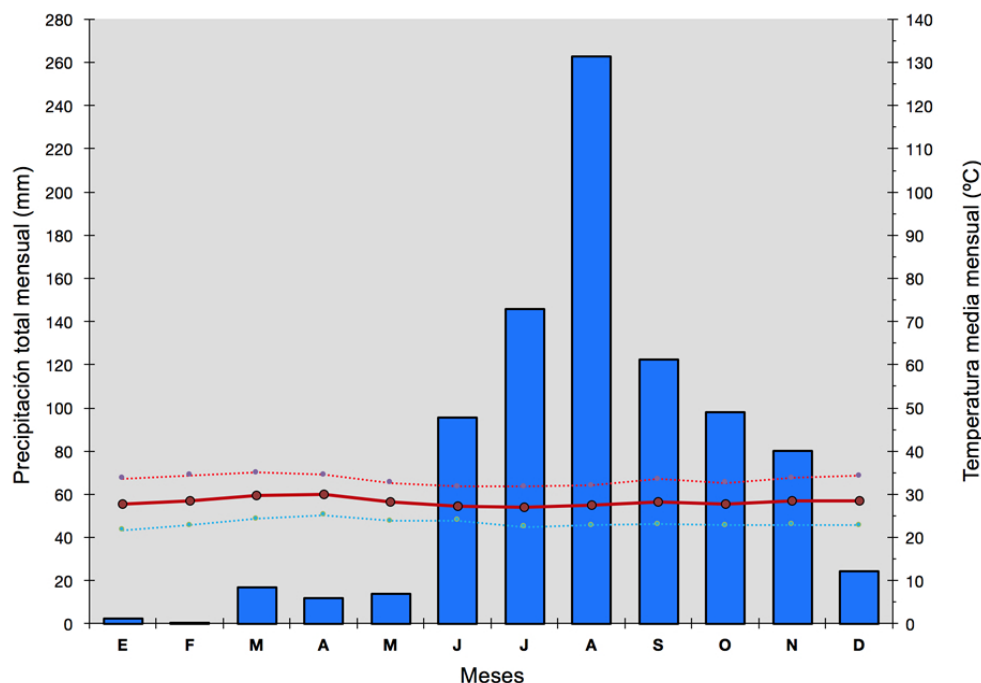


Figura 11. Climograma de la Estación Experimental La Iguana. Guárico. Barras en azul: precipitación media total mensual en milímetros; línea continua: temperatura media mensual; línea punteada turquesa: temperatura media mínima y punteada rojo: temperatura media máxima. Datos período 1999-2001, tomados de Castro (2006).

La estación ocupa aproximadamente 3000 hectáreas, con un relieve caracterizado por una ondulación suave con pendientes de 0 a 2%. Presenta un mosaico de suelos con una fertilidad de baja a media, ligeramente ácidos (Chacón et al., 1991). De acuerdo a Berroterán (2000), la concentración de cationes en el complejo de cambio sigue un orden $Al^{3+} > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^{+} > K^{+}$. El suelo, donde se realizó la investigación, se clasificó como Ultisol: Typic Plinthustults (Soil Survey Staff, 2010), con textura franco gruesa,

isohipertérmico (Lozano et al., 2010b). En un estudio realizado por Hernández et al. (2011), se determinaron los valores de las propiedades físico-químicas de este suelo, presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Características fisicoquímicas iniciales del suelo estudiado en la estación experimental La Iguana, Guárico, Venezuela.

Parámetro	Profundidad (cm)		
	0-5	5-15	15-30
Arcilla [$<2\ \mu\text{m}$] [†] (%)	2,50 (0,38) [‡]	2,94 (0,09)	10,00 (1,20)
Limo [$2-5\ \mu\text{m}$] (%)	12,51 (1,15)	11,00 (0,98)	12,00 (1,02)
Arena muy fina [$50 - 100\ \mu\text{m}$] (%)	6,99 (0,32)	3,17 (0,89)	10,00 (1,92)
Arena fina [$100 - 250\ \mu\text{m}$] (%)	48,91 (5,15)	29,05 (2,13)	36,00 (3,16)
Arena media [$250 - 500\ \mu\text{m}$] (%)	25,29 (1,12)	44,59 (3,32)	22,93 (2,16)
Arena gruesa [$500 - 1000\ \mu\text{m}$] (%)	3,29 (0,78)	7,98 (1,12)	8,20 (0,32)
Arena muy gruesa [$1000-2000\ \mu\text{m}$] (%)	0,51 (0,11)	1,27 (0,08)	0,78 (0,10)
Clase textural	Areno Franca	Areno Franca	Franco arenosa
Reacción del suelo (pH)	5,01 (0,18)	4,81 (0,25)	4,75 (0,24)
Acidez total ($\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$)	0,46 (0,21)	0,83 (0,58)	1,18 (0,73)
Aluminio intercambiable ($\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$)	0,16 (0,09)	0,34 (0,23)	0,50 (0,31)
Hidrógeno intercambiable ($\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$)	0,30 (0,18)	0,49 (0,42)	0,67 (0,53)
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	27,53 (1,32)	23,62 (3,26)	22,77 (3,62)
CIC ($\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$)	2,21 (0,54)	1,94 (0,66)	1,90 (0,82)
Materia Orgánica (%)	1,33 (0,30)	1,23 (0,26)	1,04 (0,27)
Nitrógeno total (%)	0,039 (0,007)	0,032 (0,007)	0,028 (0,007)
Nitrógeno inorgánico ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	21,34 (11,18)	17,23 (8,45)	15,73 (9,54)
Fósforo ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	11,30 (0,30)	10,01 (3,62)	8,67 (3,26)
Potasio ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	29,94 (14,10)	19,51 (7,31)	11,53 (4,40)
Calcio ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	89,64 (25,21)	63,15 (27,87)	38,11 (14,76)
Magnesio ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	51,35 (16,94)	47,19 (12,07)	39,11 (14,66)
Sodio ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2,09 (1,33)	2,40 (1,65)	3,11 (1,86)
Hierro ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	44,61 (22,07)	53,36 (25,03)	54,38 (24,96)
Cobre ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0,71 (0,44)	0,90 (0,60)	1,07 (0,57)
Manganeso ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	7,76 (3,60)	3,52 (2,64)	2,63 (1,73)
Zinc ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1,07 (0,57)	0,86 (0,37)	0,79 (0,39)

† Tamaño de partícula.

‡ Desviación estándar.

Fuente: Hernández et al. (2011)

La vegetación de este tipo de sabanas está dominada principalmente por las gramíneas *Trachypogon vestitus* (Andersson) (Chacón et al., 1991), *Trachypogon plumosus* (Humb. and Bonpl.), *Axonopus purpusii* (Mez) y *Paspalum plicatulum* (Michaux); del componente de las leguminosas, la familia

Fabaceae, es una de las principales en este tipo de sabanas, mientras el componente leñoso es discontinuo y está constituido principalmente por *Curatella americana* (L.), *Byrsonima crassifolia* (L.), *Bowdichia virgilioides* (Kunth), *Xilopia aromatica* (Lam.), *Cassia moschata* (Kunth), *Casearia sylvestris* (Swartz), *Lecythis ollaria* (Loeffl), entre otras (Berroterán, 2000).

3.2. Diseño del estudio

Una vez seleccionado el sitio dentro de la estación experimental, se realizó un análisis geoestadístico de la variabilidad espacial del suelo para definir el tamaño de la parcela de estudio, su orientación y el número de muestras a tomar (Lozano et al., 2010b), de acuerdo a lo sugerido por Carpenter (1998). Se concluyó que la parcela para la sabana natural (SN) tendría 2 ha (100 m x 200 m) y que las dos parcelas cultivadas tendrían 2,6 ha (350 x 75 m) cada una.

Antes del cultivo del maíz, éstas parcelas se sembraron, una con el pasto africano *Brachiaria dictyoneura* (Bd), que es una de las gramíneas introducidas más usadas por los productores locales, y la otra con *Centrosema macrocarpum* (Cm) que, de acuerdo a varios trabajos, es una leguminosa forrajera que presenta alta tolerancia a la sequía, permaneciendo verde por 3-4 meses en suelos bajo estrés hídrico (Ludlow et al., 1983; Schultze-Kraft y Clements, 1990). Además, esta especie presenta un buen desarrollo en suelos bien drenados y tiene una gran tolerancia a la acidez, incluyendo la toxicidad

de aluminio y manganeso, y suelos con baja disponibilidad de fósforo (Plant Use Contributors, 2016).

3.2.1. Preparación del suelo para cultivos

Para el establecimiento de las coberturas Bd y Cm, se preparó convencionalmente el terreno con dos pases cruzados de rastra; se agregó roca fosfórica (Fosfopoder ®: 33% P_2O_5), a razón de $300 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, cubriéndola con un pase de rastra. La siembra de las semillas de Bd, se hizo a razón de $4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ y la de Cm a razón de $3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, enterrándolas con un pase de rastra. La parcela de SN tuvo un manejo propio de esta región, con quemas anuales controladas al inicio de las lluvias (Lozano et al., 2010a, 2010b) y pastoreo bovino controlado, al igual en Bd y Cm, con 4 unidades animales por hectárea, dos veces al año: al inicio y al final de las lluvias (Lozano et al., 2011).

3.2.2. Establecimiento de los tratamientos

Las parcelas con Bd y Cm, se dividieron en 4 subparcelas de $350 \times 18 \text{ m}$, donde se aplicaron los diferentes tratamientos para el cultivo de maíz. Con el fin de tener tres réplicas y generar un muestreo aleatorio estratificado, estas subparcelas, al igual SN, se subdividieron en 3 unidades experimentales de $60 \times 15 \text{ m}$, dentro de las cuales se seleccionaron al azar los puntos de muestreo para la macrofauna y suelo (figura 12).

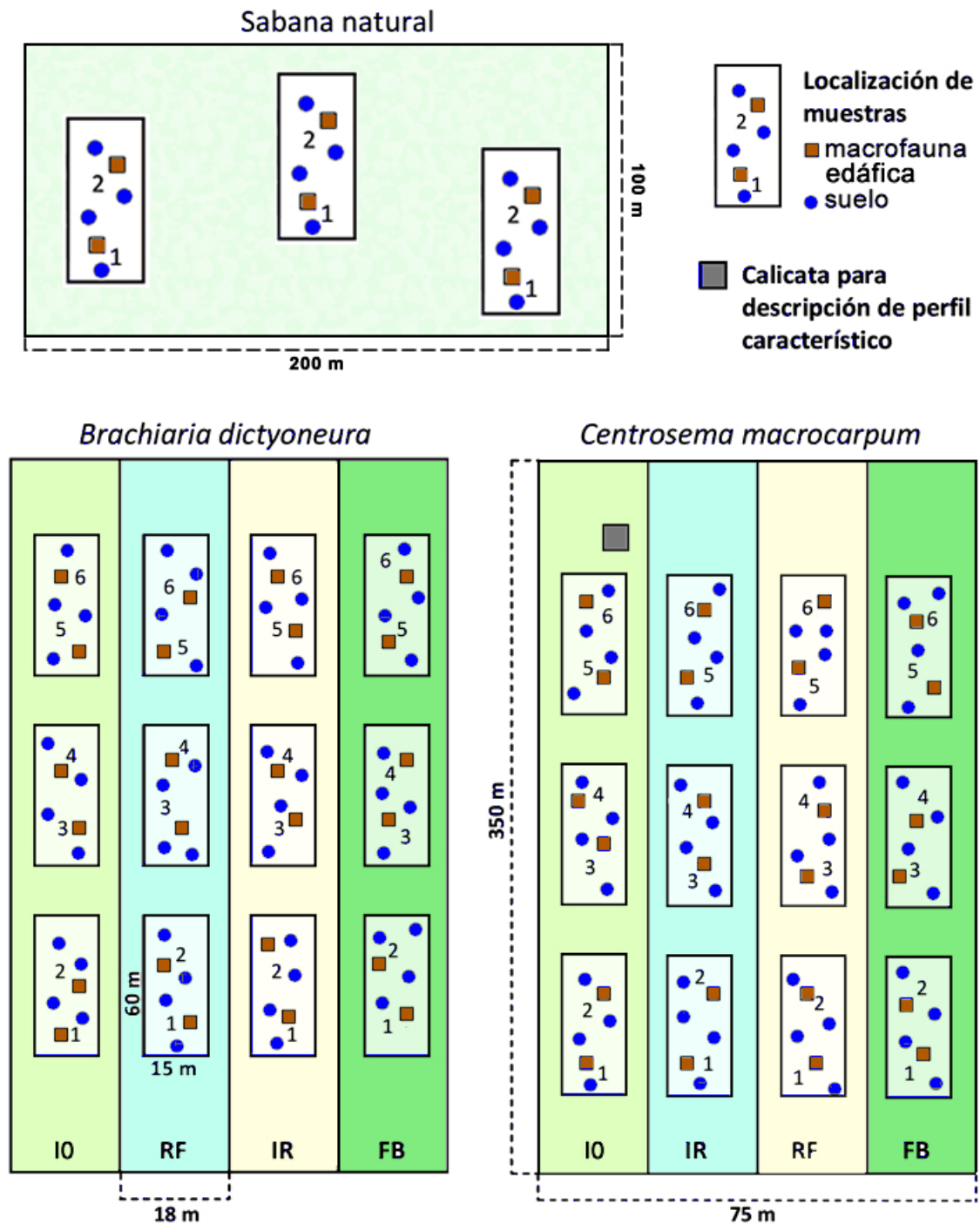


Figura 12. Distribución de las coberturas vegetales, tratamientos de fertilización y puntos de muestreo (seleccionados al azar en cada tiempo de muestreo) para los macroinvertebrados edáficos y suelo, en una sabana bien drenada del llano venezolano. IO: sin fertilización; RF: dosis alta de P (100% P_2O_5 como roca fosfórica); IR: dosis alta de P (50% del P_2O_5 como roca fosfórica + 50% como fosfato diamónico); y FB: dosis baja de P (25% del P_2O_5 como roca fosfórica+inoculación con micorrizas).

Los tratamientos de fertilización, se establecieron, como se muestra en la figura 8, a los 1036 días de sembradas las coberturas. Esto con la intención de dejar suficiente tiempo para que las coberturas vegetales se adaptaran al suelo y de que se distribuyeran, en sus parcelas, de manera “homogénea”. Los tratamientos tuvieron una fertilización base de $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de nitrógeno y de P_2O_5 , y $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de K_2O . Los tratamientos se diferenciaron por el tipo de fósforo (P) (Ramírez, 2015), a saber:

- Roca fosfórica (**RF**): con 100% P como roca;
- Fosfato diamónico (**IR**): con 50% de roca fosfórica y 50% de P en forma de fosfato diamónico;
- Fertilización biológica (**FB**): con 25% de P en forma de roca fosfórica y el resto en micorrizas nativas (*Gigaspora*, *Scutellospora*, *Acaulospora* y *Glomus*), y
- Sin fertilizar (**I0**), como testigo.

3.2.3. Siembra del cultivo de maíz

La siembra del maíz se realizó 1046 días (2 años y 10 meses con 2 semanas) después de establecidas las coberturas, para lo cual se usó semillas de la variedad híbrida IMECA 3005. El terreno de las parcelas con Bd y Cm se preparó cortando las coberturas al ras de la superficie del suelo con una rotativa y dejando sus residuos sobre el suelo. La siembra directa se hizo con una maquina sembradora SEMEATO® de tres hileras, a una densidad aproximada de $60000 \text{ plantas} \cdot \text{ha}^{-1}$.

3.2.4. Muestreos

Para estudiar la distribución vertical de la comunidad de macroinvertebrados edáficos y de las diferentes variables en el perfil del suelo, éste se dividió por capas de profundidad, según indica Lozano et al. (2010a), con el criterio del espesor medio de los horizontes A (0-15 cm) y E (15-30 cm). Del horizonte A, se tomó una capa de 0 a 5 cm de profundidad, para evaluar el efecto de los residuos vegetales de coberturas, cultivos y sistema radicular de las gramíneas en esos primeros centímetros del suelo, quedando las profundidades de 0-5, 5-15 y 15-30 cm. De esta manera, se tuvieron cuatro categorías principales en el estudio: “profundidad”, “cobertura vegetal”, “tratamiento” y “tiempo”.

3.2.4.1. Muestreo de suelo

Dentro de cada unidad experimental, se tomaron cuatro muestras de suelo que conformaron la muestra compuesta de la unidad experimental en las profundidades antes mencionadas (figura 13). Para el análisis físico, se realizaron los procedimientos descritos en Lozano et al. (2010b), Vera et al., (2012) y Hernández et al. (2011), tomándose muestras de suelo no alteradas en cilindros de 5x5cm.



Figura 13. Preparación de muestra compuesta de suelo. Estación Experimental La Iguana, Guárico. Venezuela.

Dentro de los análisis físicos, se midió el porcentaje de humedad (H) del suelo, con el método gravimétrico. La densidad aparente (D_a) se midió usando

el método del cilindro. La distribución de tamaños de poros fue determinada en mesa de tensión a saturación (P_t : porosidad total) y a un potencial mátrico de -10 kPa para la macro porosidad: poros de radio mayores a 15 μm (P_{macro}), y la porosidad de retención o micro porosidad (P_{micro}), se calculó por la diferencia $P_t - P_{\text{macro}}$ (Blake y Hartge, 1986). La conductividad hidráulica saturada (K_{Sat}), se determinó con un permeámetro de carga constante, según Plá (1983).

Para los análisis químicos, se procedió de acuerdo a Lozano et al. (2010a) y Hernández et al. (2011), se estimó el pH por duplicado, midiendo la acidez total e intercambiable (aluminio intercambiable e hidrógeno intercambiable) y la conductividad eléctrica (CE) en una reacción suelo-agua de 1: 1. La materia orgánica (MOS) se estimó con el método descrito en Heanes (1984), oxidando el carbono orgánico de la muestra de suelo con dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en medio ácido (H_2SO_4) y posteriormente analizado, a través de un espectrofotómetro. El fósforo disponible en el suelo (P) se extrajo mediante el método de Olsen et al. (1954) y se detectó con el método colorimétrico.

3.2.4.2. Muestreo de macroinvertebrados edáficos

Para el muestreo de la macrofauna del suelo, se decidió tomar dos muestras al azar dentro de cada unidad experimental, teniendo seis por sub-parcela. Siguiendo a Tropical Soil Biology y Fertility (Anderson y Ingram, 1993), cada muestra consistió de un monolito de 25x25x30 cm, dividido en las

profundidades indicadas (figura 14), de donde se extrajo manualmente los macroinvertebrados presente (Anderson y Ingram, 1998).



Figura 14. Extracción del monolito de suelo y representación de la unidad de muestreo.

La macrofauna se introdujo en viales con alcohol etílico (70%), donde se sacrificó y preservó. Se llevó al laboratorio para su separación e identificación hasta el nivel de familia, y se contabilizó (figura 15).



Figura 15. Trabajo de separación e identificación de la macrofauna. Instituto de Estudios Científicos y Tecnológicos de la UNESR. Venezuela

3.2.4.3. Muestreos de macroinvertebrados edáficos para el estudio en la sabana natural



Figura 16. Muestreo de macroinvertebrados edáficos en sabana natural, en período de inicio de lluvias. Estación Experimental La Iguana, Guárico, Venezuela.

Para el estudio en la sabana natural (figura 16), se muestreo en diferentes períodos climáticos, durante 1405 días consecutivos (tabla 2), iniciando a los dos años de establecidas las coberturas en el área bajo manejo agrícola. Este momento, para el estudio de la macrofauna edáfica en la sabana natural, es considerado como cero (0) días o T1.

3.2.4.4. Muestreos de macroinvertebrados edáficos para el estudio del efecto del manejo: coberturas y tratamientos

Para el estudio del efecto de las coberturas, se tomaron en cuenta los muestreos realizados en SN y las parcelas de cultivo con tratamiento control (I0) de cada cobertura, comenzando a los 370 días de iniciado el estudio de los macroinvertebrados en sabana natural (1037 días de establecidas las coberturas), garantizando así “homogenización” en el efecto de las coberturas en el suelo donde se establecieron. Para la evaluación del efecto del manejo agrícola sobre la macrofauna edáfica, se consideró como T1 el inicio de este estudio (tabla 2).

Con el fin de evaluar el efecto de los tratamientos de fertilización sobre la comunidad de macroinvertebrados edáficos, se consideraron los tratamientos de fertilización por cobertura vegetal. En este caso, se consideró como tiempo uno (T1) los 446 días después de iniciado el estudio, a los 2 meses y medio de iniciado el tratamiento de fertilización (tabla 2). Esto con el fin de dejar un tiempo suficiente para que el tratamiento ejerciera un efecto en el suelo.

Tabla 2. Distribución de tiempo de muestreo para el estudio de los macroinvertebrados edáficos y de suelo en una sabana natural bien drenada, y cultivo de maíz asociado con *Brachiaria dictyoneura* (Bd) y *Centrosema macrocarpum* (Cm), en los llanos venezolanos.

Descriptor	Tiempo de muestreos							
Días desde el inicio	0	370	446	558	733	831	1048	1405
Período climático	Inicio de período de lluvia	Inicio de período de lluvia	Período de lluvia	Período seco	Inicio de período de lluvia	Período de lluvia	Período seco	Período seco
	Orden Cronológico							
Sabana Natural	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Efecto de las coberturas		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Efecto de los tratamientos			T1	T2	T3	T4	T5	T6

3.3. Cálculo y procesamientos estadísticos

Los macroinvertebrados del suelo se contabilizaron por nivel taxonómico (familia y orden), discriminándose por profundidad, unidad experimental, sub-parcela (tratamiento de fertilización, si fue el caso), parcela (cobertura vegetal) y tiempo de muestreo, infiriéndose así su densidad por cada escala espacio-temporal. La riqueza de familias se obtuvo del total de familias por cada una de estas escalas. Para el cálculo de la diversidad de familias se usó el índice de Hill: N_1 como índice de diversidad (Hill, 1973).

Los análisis estadísticos univariados y bivariados, se realizaron con el paquete estadístico STATISTICA, versión 6 (StatSoft, 2001), mientras que el multivariado se realizó con el programa CANOCO for Windows 4.5 (Ter Braak y Smilauer, 2002). Se utilizó el análisis de varianza de una vía para comparar las

medias de los valores de densidad, riqueza y diversidad, por tiempo de muestreo, cobertura y/o tratamiento, y el de dos vías para evaluar la interacción entre estos factores. En todos los análisis estadísticos, se consideró significativo las pruebas cuyo valor p fue menor a 0,05. Cuando el análisis arrojó resultados significativos, las diferencias entre pares de medias, se determinó usando el test a posteriori “Least significant difference” (LSD) de Fischer (Williams y Abdi, 2010).

Para evaluar las posibles relaciones entre las propiedades físico-químicas del suelo y los macroinvertebrados edáficos, se realizó correlación lineal de Pearson y análisis multivariado, que de acuerdo a lo sugerido por Leps y Smilauer (2003), se decidió por el método lineal Análisis de Redundancia (en inglés: Redundancy Analysis –RDA-), ya que en todos los casos (estudio de la macrofauna en sabana natural, efecto de las coberturas y efecto de los tratamientos de fertilización) la máxima “longitud de gradiente” fue menor a 3. Esta longitud se calculó a través de un Análisis de Correspondencia Canónica Destendencial (en inglés: Detrended Canonical Correspondence Analysis –DCCA-).

Para el análisis de redundancia, los valores de la macrofauna se normalizaron con el error de su varianza. De esta manera, “...cuanto mejor se describa una [familia] por las variables ambientales..., mayor es el peso que tiene en el análisis final” (Leps y Smilauer, 2003). Se usó el valor mínimo de la correlación de Spearman (Verzani, 2014) para trazar el círculo de significancia,

con el que se determinó qué familias y propiedades del suelo tuvieron correlación significativa con los ejes del análisis.

De esta manera, para el estudio de la macrofauna edáfica en la sabana natural, el valor mínimo de correlación de Spearman para $n = 8$ (tiempos de muestreo), fue de 0,71 ($p < 0,05$). En el caso del estudio del efecto de las coberturas vegetales sobre la comunidad de macroinvertebrados edáficos, con un $n = 21$ (3 coberturas por 7 tiempos de muestreo) fue de 0,38 ($p < 0,05$) y para el estudio del efecto de los tratamientos de fertilización, con $n = 48$ (2 coberturas por 4 tratamientos por 6 tiempos de muestreo) fue de 0,24 ($p < 0,05$). Para la evaluar la potencialidad de algunos grupos de macroinvertebrados edáficos como indicadores del estado del suelo y su relación con las propiedades edáficas, se tuvo un $n = 9$ (2 coberturas vegetales, cada una con 4 tratamientos de fertilización y el sitio de muestreo de sabana natural), lo que corresponde a un $r_s = 0,64$ ($p < 0,05$).

El supuesto de distribución normal de los datos, se comprobó con la prueba de Shapiro-Wilk (Verzani, 2014). Las variables que no mostraron normalidad fueron previamente transformadas. Se usaron diferentes funciones matemáticas para la transformación, dependiendo de la variable y del estudio, ya que, por un lado, no todas se pudieron ajustar con la misma función y, por el otro, al cambiar el tamaño de la muestra (n) en cada estudio, el resultado de la prueba de normalidad fue diferente. En la tabla 3 se especifican las funciones de normalización en cada caso.

Tabla 3. Funciones de normalización de las variables por estudio.

Variable	Función matemática		
	Estudio 1 [†]	Estudio 2	Estudio 3
Densidad	$x^{1/2}$	$x^{1/2}$	x
Riqueza	X	$x^{1/2}$	$(x + 4)^{1/2}$
Diversidad	$x^{1/2}$	$(x+1/6)^{1/2}$	$(x + 1/2)^{1/2}$
Densidad aparente	$\text{Log}_{10}(x+1)$	x	$(\text{Log}(x))^{1/2}$
Porosidad Total	$x^{1/2}$	x	X
Macroporosidad	X	$(x + 4)^{1/2}$	$(x + 4)^{1/2}$
Microporosidad	X	x	X
Conductividad hidráulica	$\text{Log}(x+1)$	$(x + 1/16)^{1/2}$	$x^{1/2}$
Humedad	$x^{1/2}$	x	$x^{1/2}$
Materia orgánica	X	$\text{Log}_{10}(x+1)$	X
pH	X	x	X
Conductividad Eléctrica	x^{x^1}	$(\text{Log}(x+1))^{1/2}$	$(\text{Log}(x+1))^{1/2}$
Fósforo	$x^{1/2}$	x	$(\text{Log}(x+1))^{1/2}$

[†] Estudio 1: Macroinvertebrados edáficos en una sabana natural bien drenada; Estudio 2: Efecto del cultivo de maíz asociado a Bd y Cm; Estudio 3: Efecto de los tratamientos de fertilización.

Para la determinación de potenciales indicadores de la calidad del suelo, dentro de la macrofauna edáfica, se procedió a clasificarlos en base a presencia/ausencia y a la diferencia de densidades entre coberturas vegetales. La determinación del manejo agrícola (cobertura vegetal + tratamiento de fertilización) que menor impacto generó en la comunidad de macroinvertebrados, se realizó en base al índice de diversidad (N_1 de Hill), índice de similaridad de Sørensen (Sørensen, 1948). También se usó la relación lombrices: termitas para, en base a la comparación con el valor de SN, inferir el manejo agroecológico con menor impacto.

4. Resultados y Discusión

4.1. Sabana Natural



Figura 17. Sabana natural en el área de estudio. Estación Experimental La Iguana, Guárico, Venezuela. Foto: Hernández-Hernández, RM.

4.1.1. Estructura de la comunidad de macroinvertebrados edáficos

La comunidad de macroinvertebrados edáficos en la sabana natural bien drenada tuvo una densidad media total de $243,5 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, con una desviación estándar de $\pm 183,6 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, una riqueza de 32 familias; pertenecientes a 11 órdenes y una diversidad media de $N_1 = 4,5 \pm 2,8$ familias.

Respecto a la densidad media de los macroinvertebrados edáficos aquí reportada, se puede decir que, fue inferior a la referida en los trabajos de Morales y Sarmiento (2002): 407; Marichal et al. (2014): $520,9 \pm 38,4$; Domínguez et al. (2010): 1870; y de Aquino et al., (2008): $3349 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$, mientras que la riqueza (32 familias) fue similar o superior a los trabajos de Marichal et al. (2014): 10; Domínguez et al. (2010): 33; de Aquino et al., (2008): 20; y Liu et al., (2011): 31 familias. Esto podría explicarse por los factores edáficos y climáticos, especialmente las altas temperaturas (no medida en este estudio) y suelos con baja retención de humedad (Vera et al., 2012), que podrían determinar no sólo los recursos disponibles, sino también las condiciones para el metabolismo de los macroinvertebrados (Jiménez et al., 2003). Esta combinación de factores podría ser desfavorable para un gran número de poblaciones dentro de cada familia que, por otra parte, podría aumentar indirectamente la cantidad de nichos y facilitar una mayor riqueza de familias.

Por otro lado, como se puede apreciar en la tabla 4, Coleoptera fue el orden más dominante con $84,8 \pm 47,6 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$, seguido de Hymenoptera con $68,5 \pm 63,1 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ e Isoptera con $41,4 \pm 40,0 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$, mientras que el menos dominante fue Lepidoptera, con solo una media de $0,7 \pm 0,6 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$. Dentro de las Familias, el orden de importancia fue: Formicidae con una densidad media de $56,4 \pm 50,6 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$, seguido de Termitidae con $41,4 \pm 40,6 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ y Glossoscolecidae, que registró una densidad media de $22,3 \pm 18,6 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$.

Tabla 4. Densidad de ordenes y familias ($\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$) de la comunidad de macroinvertebrados edáficos en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos.

Orden	Densidad ind·m ⁻²	Familia	Densidad ind·m ⁻²	
Coleoptera	84,8 (47,6) [†]	Carabidae	16,3 (8,9)	
		Scarabaeidae	14,0 (13,5)	
		Staphylinidae	13,2 (11,1)	
		Tenebrionidae	6,1 (3,6)	
		Aphodiidae	5,8 (5,2)	
		Miridae	5,4 (4,1)	
		Chrysomelidae	4,3 (3,7)	
		Cerambycidae	3,6 (3,4)	
		Elateridae	3,5 (2,5)	
		Rutelidae	3,2 (2,8)	
		Geotrupidae	2,5 (1,5)	
		Lampyridae	2,2 (1,8)	
		Coccinellidae	2,0 (1,0)	
		Hydroscaphidae	1,5 (1,5)	
		Dynastidae	1,3 (1,0)	
Hymenoptera	68,5 (63,1)	Formicidae	56,4 (50,6)	
		Tenthredinidae	8,8 (8,2)	
		Tenthredinidae	2,0 (1,0)	
		Hym (NI)	1,3 (1,0)	
Isoptera	10,7 (10,0)	Termitidae	41,4 (40,6)	
Haplotaenidae		Glossoscolecidae	22,3 (18,6)	
Diptera		Muscidae	8,0 (7,0)	
		Dip (NI)	1,3 (1,0)	
Araneae	6,9 (6,0)	Cecydomidae	0,7 (0,5)	
		Sciaridae	0,7 (0,5)	
		Paratropididae	4,9 (4,9)	
		Dipluridae	2,0 (1,0)	
Solifugae		Ammotrechidae	1,5 (1,5)	
Chilopoda		Cryptopidae	1,3 (1,0)	
Hemiptera		Lygaeidae	1,3 (1,0)	
Homoptera		Cercopidae	1,0 (1,0)	
Lepidoptera		Pieridae	0,7 (0,5)	

[†] Desviación estándar entre paréntesis

Por otra parte, los menos dominantes pertenecieron al orden Diptera: Cecydomidae, Sciaridae, y al orden Lepidoptera: Pieridae con una densidad media de $0.7 \pm 0.5 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ cada uno.

El orden de dominancia observada en la estructura ecológica de la comunidad de la macrofauna edáfica de la sabana natural (tabla 4), fue similar a la reportada por otros autores en diferentes ambientes tropicales y extratropicales (Benito et al., 2005; de Aquino et al., 2008; Decaëns et al., 2003b; Doamba et al., 2014; Domínguez et al., 2010; Lavelle, 1983b; Liu et al., 2011; Marichal et al., 2014; Moço et al., 2010; Morales y Sarmiento, 2002; Pinzón et al., 2014; Rousseau et al., 2013; Ruiz-Cobo et al., 2010; Sisay y Ketema, 2015; Suárez et al., 2015; Vasconcellos et al., 2013; Zerbino, 2010) evidenciándose, que Coleoptera, Hymenoptera, Isoptera y Haplotaxida, constituyen los principales órdenes, independientemente del ambiente natural, bien sea por su gran abundancia o alta diversidad dentro de los invertebrados, como el caso de Coleoptera (representa alrededor del 40% de los hexápodos); Hymenoptera, está presente prácticamente en todos los hábitats terrestres y en gran número de individuos, al igual que Isoptera (Triplehorn et al., 2005).

4.1.2. Variación vertical y temporal de la macrofauna del suelo

4.1.2.1. Variación vertical

La comunidad de macroinvertebrados edáficos presentó una variación vertical en cuanto a su estructura ecológica (figura 18), que aunque los órdenes más dominantes fueron Coleoptera e Hymenoptera, independientemente de la profundidad, el resto de Ordenes que la conformaron si presentó variantes, por ejemplo, Isoptera (termitas) es el tercer orden con mayor densidad relativa en

la primera y segunda capa, pero en la tercera, Haplotaxida (lombrices de tierra) pasó a ser el tercer orden más dominante de la comunidad.

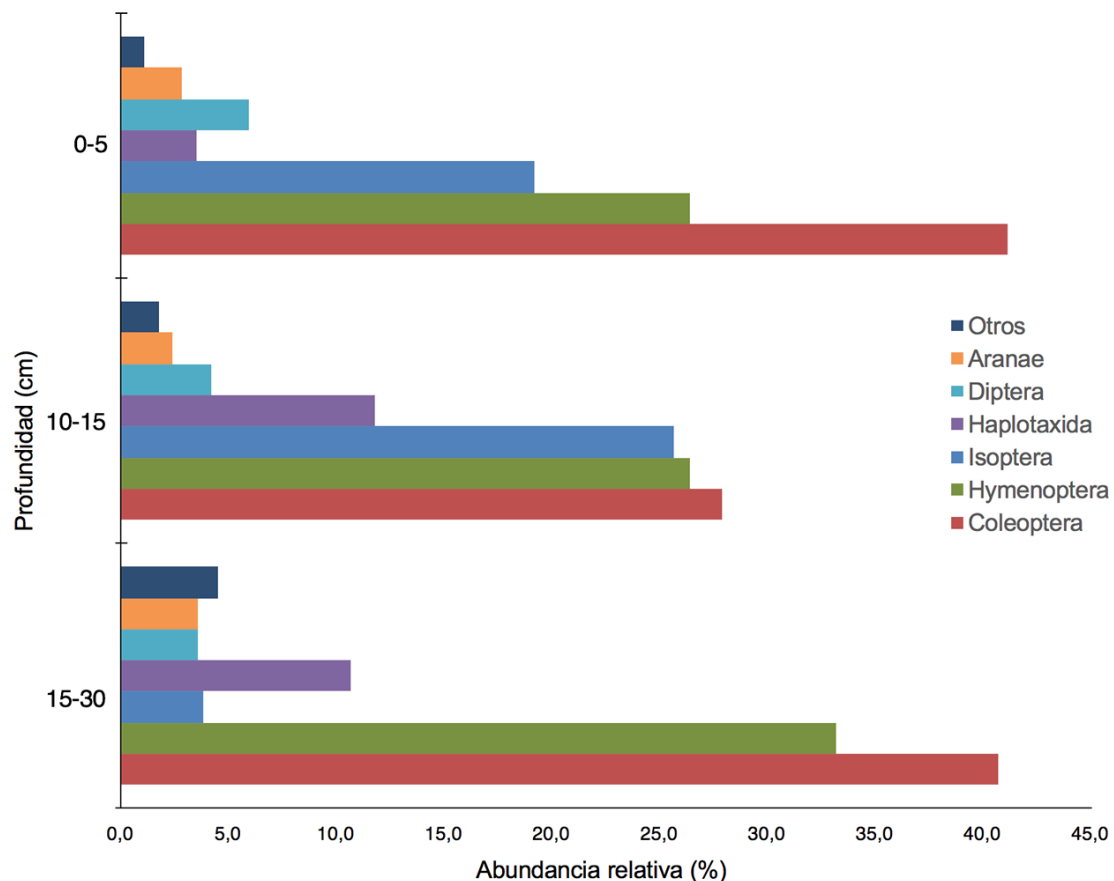


Figura 18. Abundancia relativa (%) de los macroinvertebrados del suelo en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos por profundidad (0-5, 5-15 y 15-30 cm). Otros: Solifugae, Chilopoda, Hemiptera, Homoptera, Lepidoptera con abundancia relativa menor al 1%.

Esta variación vertical de la estructura ecológica de la comunidad de macroinvertebrados edáficos, podría deberse a la existencia de grupos funcionales de macroinvertebrados (epígeos, endogénicos y anécicos) dentro de cada orden, que se han adaptado a ciertas condiciones características de cada nivel subterráneo (Lavelle, 1981), y de allí su diferenciación en densidad de un horizonte a otro.

4.1.2.2. Variación temporal

Así mismo, se pudo evidenciar que, como se muestra en la tabla 5, en cada capa del suelo, la media de los atributos ecológicos de la comunidad de macroinvertebrados edáficos mostró un patrón de variación temporal, comprobándose diferencias significativas entre tiempos de muestreo.

Tabla 5. Densidad ($\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$), riqueza y diversidad de especies de los macroinvertebrados edáficos en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos. Desviación estándar entre paréntesis.

		Tiempo							
		Inicio período de lluvia [§]	Inicio período de lluvia	Período de lluvia	Período seco	Inicio período de lluvia	Período de lluvia	Período seco	Período seco
Prof [†]	Atributo [‡]	0 [#] T1 ^{††}	370 T2	446 T3	558 T4	733 T5	831 T6	1048 T7	1405 T8
Ind·m ⁻²									
0-5	Densidad	156,0 ^{a ††} (95,5)	136,0 ^a (30,6)	10,6 ^b (9,2)	0 ^b	21,3 ^b (20,0)	42,6 ^b (40,0)	26,7 ^b (22,0)	16,0 ^b (0)
	Riqueza	3,6 ^{ab} (1,6)	5,5 ^b (1,2)	0,7 ^c (0,4)	0 ^c	1,3 ^{ac} (1,0)	2,3 ^{ac} (2,1)	1,3 ^{ac} (0,4)	1,0 ^c (0)
	Diversidad	2,9 ^a (1,4)	5,2 ^b (1,2)	0,7 ^{ac} (0,4)	0 ^c	1,3 ^{ac} (1,1)	2,2 ^{ac} (2,0)	1,3 ^{ac} (0,4)	1,0 ^c (0,0)
	Densidad	144,0 ^{ab} (100,8)	228,0 ^b (45,9)	53,3 ^{ac} (24,4)	165,3 ^{ab} (148,6)	101,3 ^{abc} (100,0)	128,0 ^{abc} (82,0)	10,6 ^c (9,2)	21,3 ^c (20,0)
5-15	Riqueza	3,1 ^b (0,6)	7,5 ^a (1,0)	2,7 ^{bc} (0,8)	3,7 ^b (2,0)	2,3 ^{bc} (1,1)	6,0 ^a (0,6)	1,7 ^{bc} (0,8)	1,0 ^c (0,6)
	Diversidad	2,6 ^b (0,5)	6,2 ^a (1,0)	2,6 ^{bc} (0,8)	2,2 ^{bc} (1,6)	1,6 ^{bc} (0,4)	5,4 ^a (0,5)	1,5 ^{bc} (0,7)	1,0 ^c (0,6)
	Densidad	40,0 ^b (39,9)	236,0 ^a (61,7)	26,6 ^b (25,2)	288,0 ^a (150,0)	16 ^b (15,3)	42,7 ^b (40,0)	5,3 ^b (5,0)	32,0 ^b (27,7)
15-30	Riqueza	1,1 ^b (0,6)	7,0 ^a (1,0)	1,7 ^b (1,5)	5,6 ^a (4,7)	0,3 ^b (0,2)	1,7 ^b (1,2)	0,3 ^b (0,2)	1,0 ^b (0,6)
	Diversidad	1,1 ^b (0,6)	5,6 ^a (1,2)	1,7 ^b (1,5)	4,4 ^a (1,7)	0,3 ^b (0,4)	1,6 ^b (1,0)	0,3 ^b (0,4)	1,0 ^b (0,6)

[†] Prof: profundidad en centímetros.

[‡] Atributo ecológico: Densidad ($\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$); Riqueza de familias; Diversidad de familias

[§] Período climático

[#] Días después de iniciado el estudio

^{††} Orden cronológico de los muestreos

^{‡‡} Letras desiguales indican diferencia significativa ($p < 0,05$) entre tiempos para una misma profundidad.

En la tabla 5, se puede apreciar que la densidad media, riqueza y diversidad de familias disminuyeron significativamente ($p < 0,05$) con el tiempo ($r = -0,62$; $r = -0,66$ y $r = -0,41$, respectivamente) en la primera capa (0-5 cm), alcanzando los mayores valores de densidad en los períodos lluviosos T1 y T2, y los de riqueza de familias en T2, seguido de T1. Este descenso de los atributos ecológicos de la macrofauna edáfica, puede estar asociado a una significativa disminución temporal de la porosidad total del suelo (Pt) y a un aumento en el tiempo de la conductividad eléctrica del suelo (CE) (tabla 6). Como se puede ver en la tabla 6, estas dos variables se relacionaron, a su vez con la densidad, riqueza y diversidad de familias.

Tabla 6. Valores de correlación (r) lineal de Pearson entre el tiempo de muestreo y los atributos ecológicos de la macrofauna edáfica (DEN: densidad; RIQ: riqueza; DIV: diversidad de familias) con las propiedades físico-químicas del suelo (P: fósforo disponible; CE: conductividad eléctrica; MOS: materia orgánica del suelo; Da: densidad aparente; Pt: porosidad total; P_{macro} : macroporosidad; P_{micro} : microporosidad; Ksat: conductividad hidráulica), por profundidad (Prof) del suelo, en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos. En rojo r con $p < 0,05$. N=30.

Prof (cm)	Variable	Atributo ecológico			Propiedades edáficas								
		DEN	RIQ	DIV	P	pH	CE	MOS	Da	Pt	P_{macro}	P_{micro}	Ksat
0-05	Tiempo	-0,62	-0,66	-0,41	0,61	-0,37	0,84	0,35	0,23	-0,55	-0,03	-0,42	-0,31
	DEN	-	-	-	-0,21	0,36	-0,51	-0,27	-0,02	0,45	0,11	0,23	0,32
	RIQ	-	-	-	-0,25	0,22	-0,49	-0,31	-0,20	0,46	0,31	0,15	0,36
	DIV	-	-	-	-0,25	0,15	-0,47	-0,31	-0,21	0,47	0,33	0,14	0,35
05-15	Tiempo	-0,47	-0,31	-0,29	0,61	-0,06	0,77	-0,36	-0,04	-0,54	0,22	-0,62	-0,19
	DEN	-	-	-	-0,35	-0,15	-0,42	0,22	-0,18	0,16	-0,04	0,17	0,36
	RIQ	-	-	-	-0,33	-0,34	-0,40	0,16	-0,38	-0,20	-0,28	0,02	0,30
	DIV	-	-	-	-0,28	-0,36	-0,42	0,17	-0,38	-0,22	-0,35	0,07	0,27
15-30	Tiempo	-0,36	-0,33	-0,30	0,60	-0,20	0,78	0,02	-0,18	0,17	-0,04	0,18	0,36
	DEN	-	-	-	-0,25	-0,01	-0,39	-0,11	-0,31	0,33	0,10	0,22	0,30
	RIQ	-	-	-	-0,28	-0,07	-0,37	-0,05	-0,32	0,34	0,10	0,23	0,31
	DIV	-	-	-	-0,26	-0,07	-0,37	-0,04	-0,33	0,35	0,11	0,23	0,32

Aunque la relación negativa entre CE y la macrofauna es contrario a lo reportado en un trabajo previo (Tao et al., 2016), esta disminución de los atributos ecológicos, se puede explicar más por la relación con Pt (Comor et al., 2014; Vasconcellos et al., 2013), cuya disminución en el tiempo se puede deber al efecto del pisoteo del ganado durante el pastoreo, tal como lo argumentaron Cecagno et al. (2016) y Schon et al. (2012). El descenso de Pt, hace disminuir el intercambio de gases y la infiltración de agua (Shaxson y Barber, 2005), clave para la biota edáfica. Por otro lado, la disminución del agua en el suelo, hace aumentar CE, tal como lo refieren Costa et al. (2014) y Grisso et al. (2009). Este hecho se evidenció con los datos de este trabajo, al encontrarse una relación negativa entre esta propiedad edáfica y Pt ($r = -0,55$; $p < 0,05$).

Respecto a la variación encontrada en la capa de 5-15 cm de profundidad, en la tabla 6 se puede apreciar, que la densidad fue el único atributo que disminuyó significativamente con el tiempo. En la tabla 5, se evidencia que los valores más altos de densidad se tienen en T2, seguido de los registrados en el período seco, en T4. Esta variación se puede explicar, igualmente por el aumento en el tiempo de CE (tabla 6), variable que se correlacionó negativamente con la densidad. En esta capa, la riqueza y diversidad de las familias tuvo un patrón de variación distinto a la primera capa de suelo, se registraron los valores más altos en el inicio del período lluvioso (T2) y en el período de lluvias (T6), y los más bajos en el período de sequía (T8).

Además, en la tabla 5, se puede apreciar un patrón de variación de la riqueza y diversidad de familias, en la capa de suelo de 05-15 cm de profundidad, que de acuerdo a lo mostrado en la tabla 6, se relacionó con la variación de la densidad aparente del suelo (Da) y CE. Se evidenció que el aumento de la Da afecta negativamente a la riqueza y diversidad de familias de la macrofauna edáfica, tal como lo reportó Vasconcellos et al. (2013) en su trabajo, explicado por el mismo principio que Pt. En teoría, el aumento de Da, indicaría aumento en la compactación del suelo, en el que el intercambio de gases e infiltración de agua en el suelo se hace más difícil, afectando su biota.

Respecto a la capa de suelo de 15-30 cm de profundidad, la variación de los atributos ecológicos (tabla 5), no sigue un patrón con el tiempo. Los valores más altos en los tres atributos ($p < 0,05$) se registraron en el inicio del período lluvioso (T2) y el seco (T4), mientras que, en el resto del tiempo, los valores fueron relativamente bajos. Para esta capa la única propiedad edáfica que se correlacionó significativamente fue CE (tabla 6).

Por otra parte, sin discriminar por profundidad (figura 19), se evidenció que la densidad, riqueza y diversidad de familias, muestran una tendencia a disminuir con el tiempo. Esto se pudo comprobar a través de una correlación lineal de Pearson, entre el tiempo de muestreo y los atributos ecológicos de la comunidad de macroinvertebrados edáficos (tabla 8).

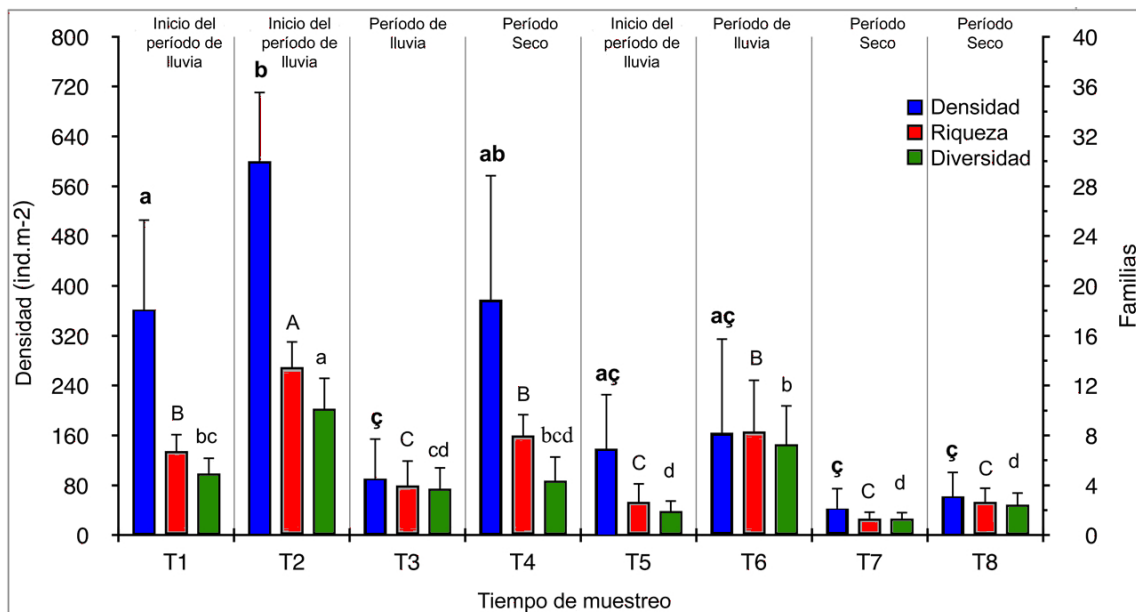


Figura 19. Densidad, riqueza y diversidad de familias de los macroinvertebrados edáficos en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos, para cada tiempo de muestreo (T_x). Letras desiguales en minúsculas y negritas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) para la densidad, letras mayúsculas para la riqueza de familias y letras minúsculas para la diversidad de familias. Se indica el período climático.

Por otro lado, en la figura 19, se puede apreciar que las medias de densidad, riqueza y diversidad de familias de la comunidad de macroinvertebrados del suelo presentaron diferencias significativas entre los tiempos de muestreo (tabla 7), siendo sus mayores valores en T2, inicio de lluvia ($600,0 \pm 88,0 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$; $13,5 \pm 4,0$ y $10,1 \pm 5,3$ familias, respectivamente) y los menores en T7, período seco (densidad: $42,7 \pm 24,9 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$; riqueza: $1,3 \pm 1,0$ familias y diversidad: $1,3 \pm 1,0$ familias).

Tabla 7. Resumen de los efectos del análisis de varianza para la comparación entre tiempos de muestreo, utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.

Atributo ecológico	SS	Grados de libertad	MS	F	<i>p</i>
Densidad	1010000,0	7,0	144000,00	6,76	0,000
Riqueza	399,1	7,0	57,02	15,08	0,000
Diversidad	214,2	7,0	30,60	9,88	0,000

Tal como se muestra en la tabla 8, la disminución temporal, en los atributos ecológicos de la comunidad de macroinvertebrados edáficos, estuvo asociada con un aumento significativo en el tiempo de CE ($r = 0,77$) y disminución de Pt ($r = - 0,82$). Los tres atributos ecológicos se correlacionaron negativamente con CE, mientras que con Pt se correlacionaron positivamente la densidad y riqueza de familias; mientras que con Da, se correlacionó negativamente la riqueza de familias.

4.1.3. Relación de la macrofauna edáfica y las propiedades del suelo

La correlación existente entre los atributos de la macrofauna del suelo con las propiedades del suelo Da, Pt y CE (tabla 8), sugieren que, a pesar de que el porcentaje de humedad del suelo (H) no se correlacionó directamente con la macrofauna edáfica, a través de Da, Pt y CE, como se refirió anteriormente, pudo ser un factor determinante para los macroinvertebrados edáficos. Al respecto, Araujo y López-Hernández (1999), encuentran que en las sabanas, la textura, temperatura y la humedad del suelo, son condicionantes de las lombrices de tierra.

Tabla 8. Correlación lineal de Pearson (r) entre el tiempo de muestreo y los atributos ecológicos: densidad, riqueza y diversidad de familias de los macroinvertebrados del suelo con las propiedades edáficas, en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos. N = 48.

Variable [†]	Propiedades físico-químicas del suelo									
	P [‡]	pH	CE	MOS	Da	Pt	P _{macro}	P _{micro}	Ksat	H
Tiempo	0,65 [§]	-0,25	0,77	0,07	0,11	-0,82	0,11	-0,63	-0,29	-0,03
DEN	-0,32	-0,06	-0,37	0,01	-0,24	0,52	0,01	0,29	0,24	-0,15
RIQ	-0,32	-0,16	-0,41	-0,13	-0,38	0,37	-0,01	0,22	0,33	-0,14
DIV	-0,33	-0,14	-0,51	-0,17	-0,29	0,31	-0,14	0,32	0,3	-0,01

[†] Tiempo: tiempo de muestreo; Den: densidad; RIQ: riqueza de familias; DIV: diversidad de familias.

[‡] P: fósforo disponible; CE: conductividad eléctrica; MOS: materia orgánica del suelo; Da: densidad aparente; Pt: porosidad total; P_{macro}: macroporosidad; P_{micro}: microporosidad; Ksat: conductividad hidráulica; H: porcentaje de humedad.

[§] Números en rojo indican correlación significativa.

Por otro lado, analizando las relaciones existentes entre la densidad media de las familias de los macroinvertebrados edáficos y las propiedades del suelo, el Análisis de Redundancia (RDA) mostrado en la figura 20 (eje 1 y 2) y figura 21 (eje 1 y 3), revela que sus tres primeros ejes, explican el 82% de la varianza total.

En la figura 20, el primer eje, está determinado principalmente por Rutelidae, Geotrupilidae y, en menor grado, por Muscidae; en dirección opuesta por Cerambycidae y Formicidae. El segundo eje, Termitidae y Staphylinidae; y el tercero por Tenthredinidae y Glossocolecidae, mientras que en dirección opuesta por Aphodiidae y Lampyridae.

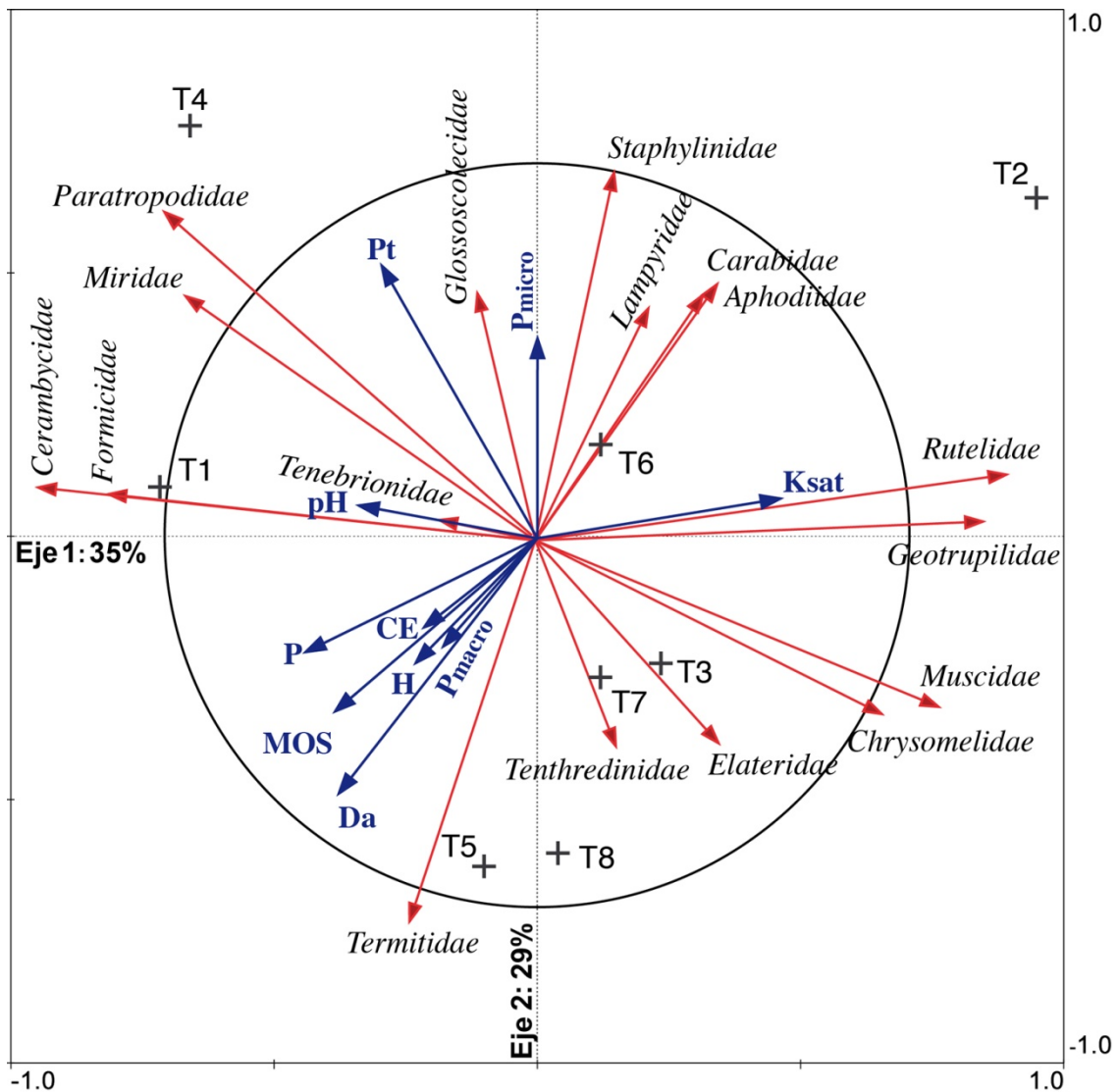


Figura 20. RDA (ejes 1 y 2), correlacionando la densidad de familias de macroinvertebrados edáficos (vector rojo) con las propiedades del suelo (vector azul) en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos. Círculo central indica valor mínimo de correlación ($r_s = 0,71$). Se consideraron familias con densidad mayor a $2 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$. MOS: materia orgánica del suelo; CE: conductividad eléctrica; P: fósforo disponible; P_{macro} : macroporosidad; P_{micro} : microporosidad; Pt: porosidad total; Da: densidad aparente; H: porcentaje de humedad; Ksat: conductividad hidráulica.

De acuerdo con el valor mínimo de correlación, las propiedades del suelo que se correlacionan significativamente con los ejes del RDA,

presentados en la figura 20 y 21, fueron P_{macro} y en dirección opuesta P_{micro} (tabla 9).

Tabla 9. Correlación (r) de los propiedades físico-químicas del suelo con los ejes del RDA, formado a través de la densidad de familias de la macrofauna del suelo de una sabana natural en los llanos venezolanos. Valores en rojo indican correlación significativa ($p < 0,05$) para un $n = 8$.

Parámetro	Valor r_s		
	Eje 1	Eje 2	Eje 3
Densidad aparente (Da)	-0,38	-0,48	-0,18
Porosidad total (Pt)	-0,30	0,52	0,13
Macro Porosidad (P_{macro})	-0,18	-0,20	-0,82
Micro Porosidad (P_{micro})	0,00	0,38	0,71
Conductividad hidráulica (Ksat)	0,46	0,08	0,10
Humedad (H)	-0,23	-0,24	0,65
Materia orgánica de suelo (MOS)	-0,38	-0,33	-0,58
pH	-0,34	0,06	0,10
Conductividad Eléctrica (CE)	-0,21	-0,17	-0,61
Fósforo disponible (P)	-0,44	-0,22	-0,43

Considerando los valores de la tabla 9 y visualizando la figura 21, se puede apreciar un gradiente de porosidad edáfica (P_{micro} a P_{macro}) a lo largo del eje 3, que agrupa, por un lado, a T3 y T6 (períodos de lluvia). Estos sitios estuvieron determinados por la densidad de Tenthredinidae, Glossoscolecidae y Staphylinidae que, a su vez, se relacionan con valores altos de P_{micro} . Esto pudo estar asociado al efecto que tiene esta propiedad de retener el agua durante más tiempo en el suelo y el beneficio que puede tener en época seca para estos macroinvertebrados edáficos (Lavelle et al., 1993).

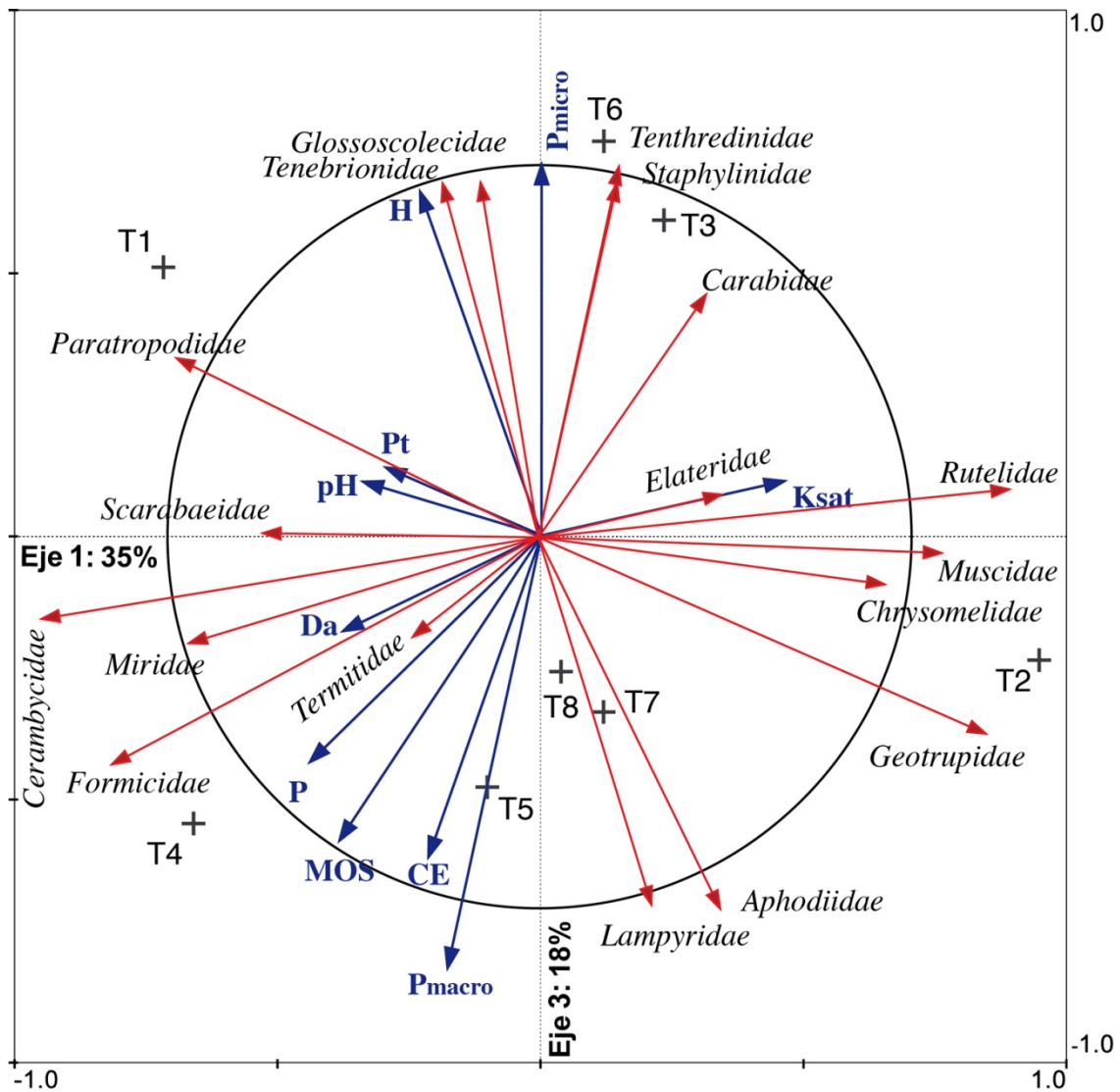


Figura 21. RDA (ejes 1 y 3), correlacionando la densidad de familias de macroinvertebrados edáficos (vector rojo) con las propiedades del suelo (vector azul) en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos. Círculo central indica valor mínimo de correlación ($r_s = 0,71$). Se consideraron familias con densidad mayor a 2 ind·m⁻². MOS: materia orgánica del suelo; CE: conductividad eléctrica; P: fósforo disponible; P_{macro} : macroporosidad; P_{micro} : microporosidad; Pt: porosidad total; Da: densidad aparente; H: porcentaje de humedad; Ksat: conductividad hidráulica.

Por otro lado, en la figura 21, se puede apreciar que T4, T7 y T8 (períodos secos), estuvieron determinados principalmente por Lampyridae,

Aphodiidae y Termitidae. La correlación entre P_{macro} y las familias Lampyridae y Aphodiidae, del orden Coleoptera, se corresponde con el trabajo de Vasconcellos et al. (2013), y la familia Termitidae con el trabajo de Lavelle et al. (2003) y Kooyman y Onck (1987). Estos últimos, encuentran que la actividad de las termitas hace disminuir los valores de P_{micro} , lo que explicaría la relación negativa entre la densidad de Termitidae y este parámetro físico (vectores en contrasentido), y aumentar P_{macro} .

Lo anterior sugiere que, por lo menos en las tres dimensiones mostradas del RDA (figuras 20 y 21), los tiempos de muestreo no presentan un arreglo que se correspondan con el orden cronológico, aunque si, débilmente, con el período climático. Sin embargo, para los tiempos de muestreos correspondientes a “inicio del período de lluvia”, no tuvieron un ordenamiento definido. T5 y en menor grado T2, por ejemplo, tuvieron una similitud con los del período seco, mientras T1 mostró más correspondencia con los tiempos de muestreo del período de lluvia.

A pesar de que hay una aparente influencia de los períodos climáticos sobre la macrofauna del suelo, se pudo comprobar que no existen diferencias significativas entre los períodos “inicio de lluvias”, lluvias y sequía, cuando se compararon respecto a la densidad media de la comunidad de macroinvertebrados edáficos ($F = 3,30$; $p = 0,052$), la riqueza ($F = 2,63$; $p = 0,09$) y diversidad de familias ($F = 3,31$; $p = 0,052$).

4.2. Manejo agrícola de la sabana y su efecto en la macrofauna edáfica



Figura 22. Coberturas vegetales: *Centrosema macrocarpum* (parte superior) y *Brachiaria dictyoneura* (parte inferior) en área de estudio.

4.2.1. Efecto en la estructura de la comunidad de macroinvertebrados edáficos

Los resultados revelan diferencias en la estructura ecológica entre las comunidades de macroinvertebrados edáficos asociadas a las coberturas vegetales, en cuanto a cantidad y composición de órdenes y familias (tabla 10). La sabana natural registró 11 órdenes con 31 familias, mientras que la cobertura vegetal de *Brachiaria dictyoneura* (Bd), 13 ordenes con 30 familias, y con *Centrosema macrocarpum* (Cm), 10 órdenes y 25 familias. En Bd, se registran los órdenes Orthoptera, Blattodea y Psocoptera, los cuales estuvieron ausentes en la SN. Mientras que las familias del orden Coleoptera: Coccinellidae y Dynastidae; de Diptera: Cecidomyiidae; y de Lepidoptera: Pieridae, solo estuvieron presentes en la SN. La presencia de estas familias solo en SN, pudiera suponer que este grupo de insectos tienen una alta sensibilidad a cambios en el suelo producidos por la actividad agroecológica.

Los cambios en la estructura de la comunidad de la macrofauna, apreciados en la tabla 10, pueden estar asociados a variaciones de algunas propiedades edáficas, por ejemplo, en este mismo ensayo, Lozano et al. (2010b) encontró que Da disminuyó en las coberturas vegetales respecto a SN sugiriendo que el manejo agroecológico, mejoró esta condición y contradiciendo los reportes de varios autores (de Aquino et al., 2008; Domínguez et al., 2010, 2009; Piccoli et al., 2017; Rendón et al., 2011), quienes encuentran un aumento de compactación del suelo en las parcelas de cultivo respecto a las sabanas naturales.

Tabla 10. Densidad media ($\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$) de los ordenes y familias, y media de la densidad, riqueza y diversidad de las comunidades de los macroinvertebrados edáficos de una sabana natural (SN) y coberturas introducidas *Brachiaria dictyoneura* (Bd) y *Centrosema macrocarpum* (Cm), en la Estación Experimental La Iguana.

Orden	Cobertura vegetal			Familia	Cobertura vegetal		
	SN	Bd	Cm		SN	Bd	Cm
$\text{Ind}\cdot\text{m}^{-2}$				$\text{Ind}\cdot\text{m}^{-2}$			
Isoptera	30,5 (46,4) [†]	162,3 (158,3)	92,6 (89,3)	Termitidae	30,5 (46,4)	161,5 (159,2)	92,6 (89,3)
				Pentatomidae	0	0,8 (1,5)	0
Coleoptera	77,5 (52,8)	48,4 (47,7)	45,1 (38,1)	Carabidae	18,5 (18,3)	20,2 (18,1)	10,7 (10,2)
				Staphylinidae	12,2 (16,3)	8,6 (8,1)	7,4 (7,9)
				Scarabaeidae	13,7 (17,0)	5,3 (8,1)	3,8 (5,2)
				Aphodiidae	5,5 (8,9)	4,6 (4,4)	11,8 (9,9)
				Tenebrionidae	5,1 (6,9)	2,3 (4,1)	3,4 (5,2)
				Rutelidae	4,0 (6,5)	2,7 (4,3)	1,9 (3,4)
				Elateridae	3,6 (5,5)	1,9 (3,3)	1,5 (2,8)
				Chrysomelidae	3,4 (5,6)	0,2 (0,4)	1,7 (3,1)
				Hydroscaphidae	2,1 (3,8)	1,7 (2,9)	0,8 (1,5)
				Lampyridae	2,9 (4,6)	0,2 (0,4)	0
				Cerambycidae	1,7 (3,1)	0	1,0 (1,7)
				Coccinelidae	2,3 (4,1)	0	0
				Geotrupidae	1,0 (1,8)	0	1,1 (2,1)
				Dynastidae	1,5 (2,8)	0	0
				Curculionidae	0	0,8 (1,5)	0
Hymenoptera	66,5 (64,1)	25,5 (24,9)	45,1 (41,9)	Formicidae	57,7 (71,3)	23,8 (22,5)	28,8 (27,3)
				Tenthredinidae	7,2 (11,0)	1,0 (1,7)	11,8 (10,9)
				Larva (NI) [‡]	1,5 (2,8)	0,8 (1,5)	4,6 (4,8)
Haplotaxida				Glossoscolecidae	19,8 (23,0)	19,2 (12,9)	17,5 (16,5)
Diptera	9,9 (12,3)	6,9 (10,4)	7,8 (13,0)	Muscidae	6,9 (10,4)	3,0 (5,5)	3,2 (3,9)
				Larva (NI)	1,5 (2,8)	3,0 (5,5)	2,3 (4,1)
				Sciaridae	0,8 (1,5)	0,8 (1,5)	2,3 (1,4)
				Cecidyomidae	0,8 (1,5)	0	0
Hemiptera	5,1 (7,8)	4,0 (6,5)	4,0 (6,9)	Miridae	3,6 (5,9)	1,0 (1,7)	4,0 (5,9)
				Lygaeidae	1,5 (2,8)	3,0 (5,5)	0
Araeae	6,5 (9,3)	2,3 (3,9)	2,5 (4,2)	Paratropididae	4,2 (6,4)	1,5 (2,8)	2,5 (4,2)
				Dipluridae	2,3 (4,1)	0,8 (1,5)	0
Homoptera				Cercopidae	1,1 (2,1)	3,2 (5,6)	0,8 (1,5)
Chilopoda	1,5 (2,8)	0,8 (1,5)	2,3 (3,9)	Cryptopidae	1,5 (2,8)	0,8 (1,5)	1,5 (2,8)
				Scolopendridae	0	0	0,8 (1,5)
Solifugae				Ammotrechidae	2,1 (3,8)	1,7 (1,9)	0
Blattodea				Blattelidae	0	0,8 (1,5)	1,5 (2,8)
Lepidoptera				Pieridae	0,8 (1,5)	0	0
Orthoptera				Gryllotalpidae	0	0,8 (1,5)	0
Psocoptera				Psocidae	0	0,8 (1,5)	0
Densidad					221,3 (166,6)	276,6 (266,5)	205,5 (155,4)
Riqueza					6,0 (3,9)	4,2 (3,6)	4,6 (3,0)
Diversidad					4,5 (2,8)	2,6 (2,1)	3,2 (1,9)

[†] Desviación estándar

[‡] Larva no identificada

Además, Castro (2016), Hernández et al. (2011) y Ramírez (2015), para este mismo ensayo, encontraron variaciones significativas en el nitrógeno total, fósforo disponible (P) y materia orgánica del suelo (MOS), entre las coberturas y SN, registrándose un incremento de estas propiedades en Bd y Cm respecto a SN. Esta variación estuvo asociada al manejo agrícola que, por un lado, incrementó P, dada la aplicación de roca fosfórica en la preparación del terreno para los cultivos y, por otro lado, a la incorporación de MOS al suelo, por los residuos vegetales dejados en la superficie durante los ciclos de cultivos, que favoreció la actividad biológica del suelo, tal como lo señalan varios autores (Palm et al., 2014; Shao et al., 2016; Zhang et al., 2017).

Sin embargo, al comparar cuantitativamente las comunidades de macroinvertebrados edáficos en cada cobertura vegetal, no se encontraron diferencias significativas entre éstas, respecto a la densidad de las distintas familias de la macrofauna del suelo ($p > 0,05$), tampoco cuando se consideró la media de la densidad de la comunidad de macroinvertebrados edáficos por cada cobertura ($F = 0,97$; $p = 0,38$), ni la riqueza de familias ($F = 1,95$; $p = 0,15$). Aunque contradice trabajos previos, por un lado, los que reportan un efecto positivo del manejo conservacionista sobre la macrofauna del suelo (Bedano et al., 2016; Decaëns et al., 2003a, 2001; Lal, 1988); y por otro lado, los que encuentran un efecto negativo del manejo conservacionista aplicado en sus estudios (cero arado) (de Aquino et al., 2008; Domínguez et al., 2010, 2009; Rendón et al., 2011); esto se pudo deber al hecho de que el manejo agroecológico conservó, hasta cierto punto, las condiciones naturales del suelo; por lo que estos atributos ecológicos no se afectaron significativamente.

Sin embargo, cuando se consideró la diversidad de familias, se registró diferencia ($p < 0,05$) entre cobertura vegetal (figura 23), lo que sugiere que la diversidad de familias fue un atributo ecológico más sensible al disturbio generado por este manejo agrícola.

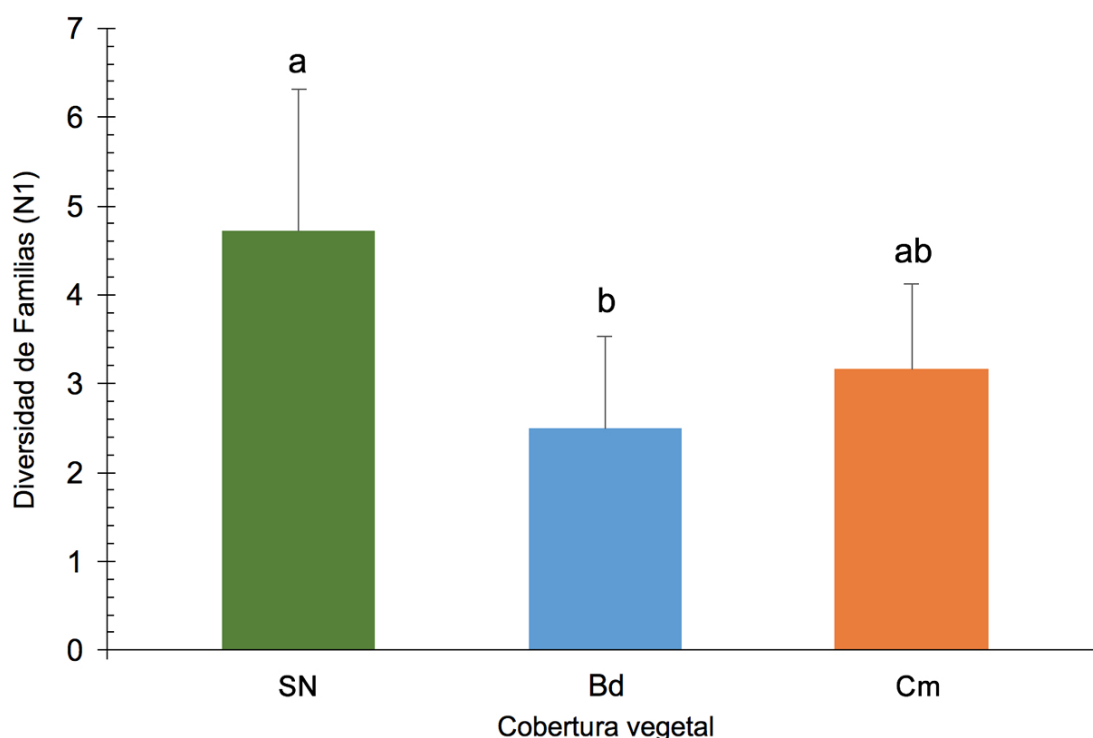


Figura 23. Diversidad de familias (N_1) de la comunidad de macroinvertebrados edáficos en cada cobertura vegetal (SN: sabana natural; Bd: *Brachiaria dictyoneura* y Cm: *Centrosema macrocarpum*) en la Estación Experimental La Iguana. Letras desiguales indican diferencias significativas entre coberturas.

En la figura 23, se puede apreciar la diferencia ($p < 0,05$) entre coberturas, considerando la diversidad de familias. SN presentó el mayor valor de diversidad ($4,72 \pm 1,59$ familias), mientras que Bd registró el menor valor ($2,49 \pm 1,05$ familias). Cm registró un valor intermedio ($3,16 \pm 0,97$ familias) y no se diferenció de SN ni de Bd. Esto se pudo deber a una disminución de

P_{macro} en Bd respecto a Cm y SN, que se evidenció en el trabajo de Lozano et al. (2010b) para este mismo ensayo; lo que también se corresponde con los reportes de Domínguez et al. (2010, 2009), quienes encuentran una disminución de la diversidad en el manejo agrícola conservacionista, producto de la disminución de la porosidad del suelo. Esto es un hecho significativo, pues indicaría que en Cm se generaron condiciones edáficas propicias para el desarrollo y mantenimiento de una comunidad de macroinvertebrados edáficos con un índice de diversidad de familias similar estadísticamente a SN.

No obstante, este resultado es un análisis respecto a la media de la diversidad de familias de la comunidad y no está considerando las familias y/o ordenes presentes o ausentes en cada cobertura. En este sentido, se analizó la comunidad de macroinvertebrados edáficos en cada cobertura vegetal, en cuanto a su estructura ecológica (figura 24).

En la figura 24, se muestra la estructura ecológica representada por la abundancia relativa de los principales ordenes de los macroinvertebrados edáficos registrados en cada cobertura vegetal. Se puede comprobar que existen cambios en la abundancia relativa de los órdenes de la macrofauna edáfica respecto a la cobertura vegetal, evidenciándose, que Isoptera pasa de ser el tercero más abundante, con 14% en SN a ser el principal en Bd y Cm, con 59% y 42%, respectivamente. Mientras tanto, Coleoptera, con 35%, que fue el más dominante en SN, seguido de Hymenoptera, con 30%, pasaron a ser segundo y tercero, respectivamente, en los suelos intervenidos.

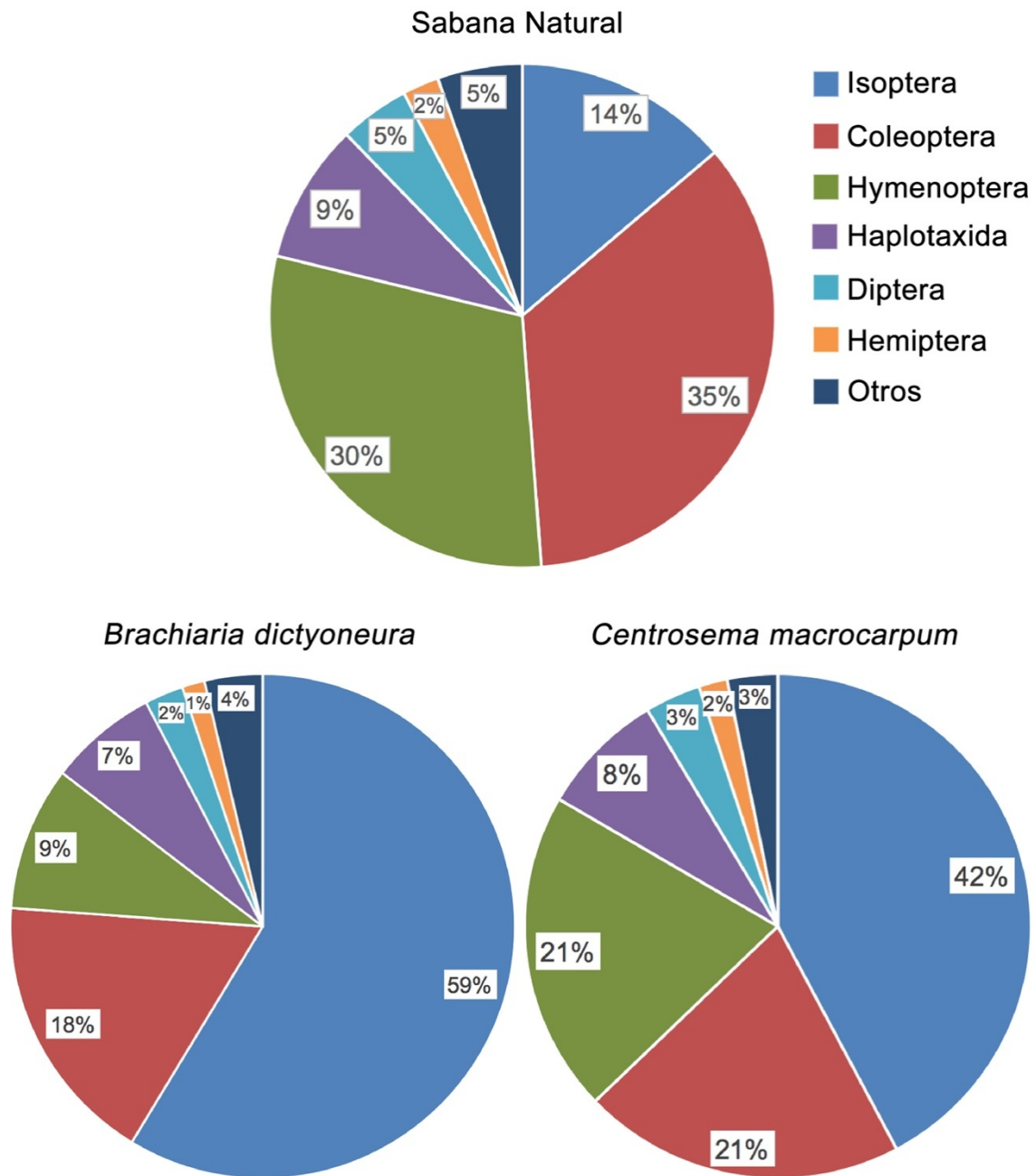


Figura 24. Abundancia relativa (%) de los ordenes de los macroinvertebrados edáficos por cobertura de vegetal: sabana natural, *Brachiaria dictyoneura* y *Centrosema macrocarpum* en la Estación Experimental La Iguana. Otros: Araneae; Homoptera, Chilopoda, Solifugae, Blattodea, Lepidoptera, Orthoptera y Psocoptera, con abundancia relativa menor a 2%.

Según lo que se puede apreciar en la figura 24, Haplotaxida (lombrices de tierra), en cuanto a su abundancia relativa y en comparación a los tres ordenes más dominantes, no fue tan afectada por el manejo agrícola.

Por otro lado, el evidente incremento de Isoptera en las coberturas vegetales introducidas y en especial Bd, se pudo deber al hecho de que este grupo de invertebrados se vio favorecido por el incremento de MOS en las coberturas vegetales introducidas, que como se refirió anteriormente, fue producto de la incorporación de la necromasa de los residuos vegetales de los cultivos y las coberturas vegetales asociadas (Zhang et al., 2017). Esto se corresponde con varios autores (Ayuke et al., 2011; Lavelle et al., 1994; Paul et al., 2015), quienes atribuyeron la dominancia de Isoptera a los residuos de cultivo dejados sobre el suelo, convirtiéndose en la principal fuente de alimento de este grupo de invertebrados. Adicionalmente, el sistema radicular de Bd, pudo generar condiciones en el suelo distintas a las de SN y Cm, ya que sus raíces son más fibrosas (Lozano et al., 2010b) y densas, generando un mantillo (Vera et al., 2012) que, además por el mucilago secretado, favorecen la protección de agregados del suelo y mejores condiciones para las colonias de Termitidae, interacción biótica que es referida por Lavelle et al. (2016).

4.2.2. Efecto del manejo agroecológico en la variación vertical de la macrofauna edáfica

El manejo agrícola, también afectó la estructura ecológica de la macrofauna edáfica en el gradiente vertical. En la figura 25, se observa cómo

se alteró el orden de dominancia de algunos taxa respecto a SN e incluso, la ausencia de Araneae en las capas del suelo 0-5 y 5-15 cm de Bd, y de ordenes con abundancia relativa menor a 1,2%, en la profundidad de 5-15 cm en Cm.

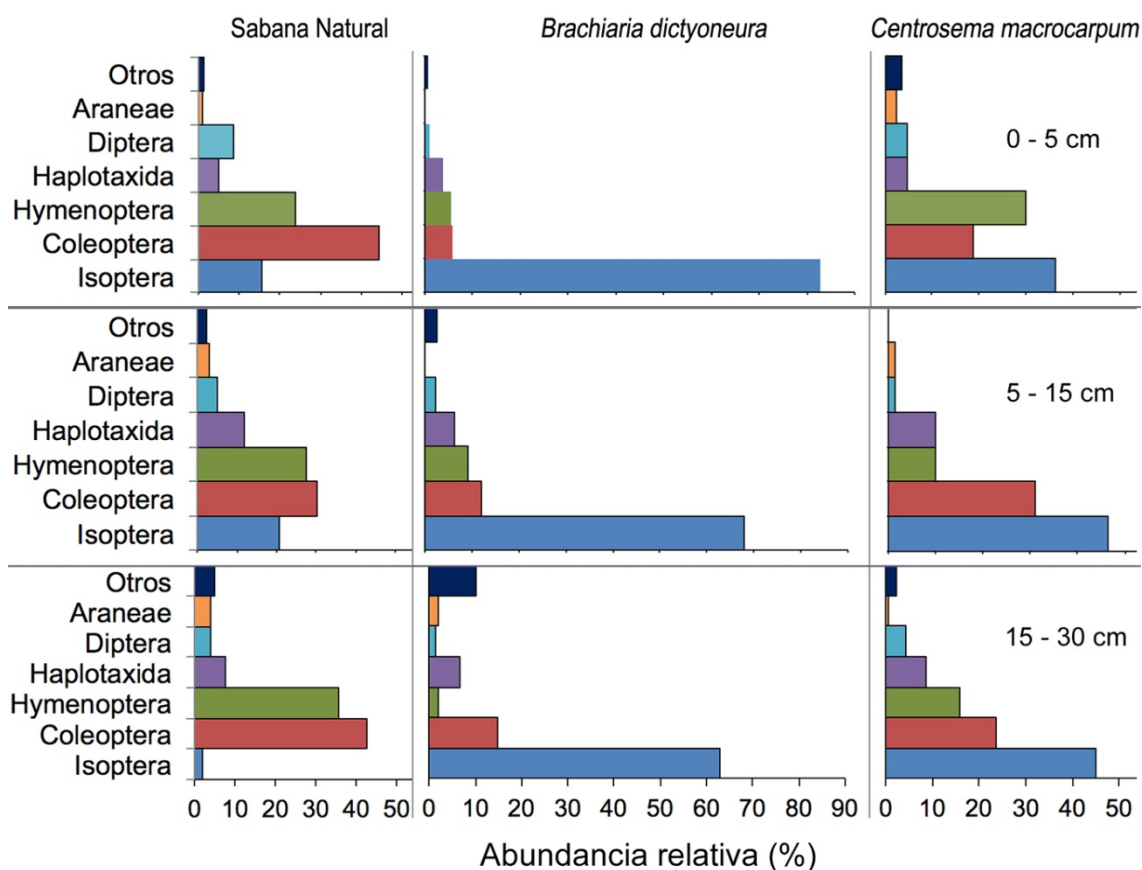


Figura 25. Abundancia relativa (%) de la macrofauna por profundidad del suelo (0-5, 5-15 y 15-30 cm), y por cobertura de vegetal: sabana natural, *Brachiaria dictyoneura* y *Centrosema macrocarpum* en la Estación Experimental La Iguana. Otros: Homoptera, Orthoptera, Chilopoda, Hemiptera, Solifugae, Blattodea, Psocoptera, Lepidoptera con abundancia relativa menor a 1,2 %.

Observando la figura 25, se puede inferir que Bd tuvo un mayor impacto sobre la comunidad de la macrofauna edáfica, favoreciendo el incremento de 6 y 8 veces más la abundancia de Isoptera en relación a los otros ordenes. Mientras que Cm mostró una dominancia más equitativa, similar a SN.

En base a estos resultados, se puede deducir que Cm generó o mantuvo unas condiciones edáficas, para la macrofauna edáfica, similares a SN. Por otro lado, también se puede inferir que Termitidae (Isoptera) fue ampliamente favorecida por el manejo agroecológico respecto otros invertebrados, explicado por el incremento de MOS en las coberturas vegetales introducidas y, dentro de estas, además por el sistema radicular de Bd. Un hecho interesante es que, en el gradiente vertical, hubo una presencia importante de este orden, lo que, a la larga, puede favorecer la distribución de MOS.

4.2.3. Efecto del manejo agrícola sobre la macrofauna edáfica en el gradiente temporal



Figura 26. Área de cultivo en época seca. Estación Experimental La Iguana, Guárico. Venezuela.

Como se mencionó anteriormente, la densidad media de la macrofauna edáfica, no fue afectada significativamente por el manejo agrícola. Esto se corroboró, analizando el efecto del disturbio sobre la densidad a lo largo de los tiempos de muestreo. El análisis de varianza de dos vías, usando los factores “cobertura vegetal” y “tiempo”, indica que no hubo interacción entre estas (tabla 11), por lo tanto, se analizó la variación temporal de la densidad media de la macrofauna edáfica, sin discriminar por cobertura.

Por otro lado, como se muestra en la tabla 11, al correr este análisis con la riqueza y diversidad de familias, se encontró interacción entre “cobertura vegetal” y “tiempo”, por lo que la variación temporal de estos atributos se analizó discriminando por cobertura vegetal (figura 27).

Tabla 11. Resumen de los efectos del análisis de varianza de dos vías para la interacción entre factores "tiempos de muestreo" (Tiempo) y "cobertura vegetal" (COV), utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.

Atributo ecológico	Efecto	SS	Grados de libertad	MS	F	p
Densidad	Tiempo	4220000,0	6,0	703000,00	3,27	0,009
	COV	312000,0	2,0	156000,00	0,73	0,490
	Tiempo*COV	3040000,0	12,0	254000,00	1,18	0,326
Riqueza	Tiempo	526,7	6,0	87,78	18,39	0,000
	COV	47,6	2,0	23,82	4,99	0,011
	Tiempo*COV	214,4	12,0	17,87	3,74	0,001
Diversidad	Tiempo	209,6	6,0	34,94	13,09	0,000
	COV	45,4	2,0	22,71	8,51	0,001
	Tiempo*COV	157,7	12,0	13,14	4,92	0,000

La figura 27, muestra la variación temporal de la densidad (parte superior), evidenciándose que en T1 (inicio del período de lluvias) se registraron los valores más altos ($p < 0,05$) ($785,33 \pm 643,04 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$), seguido de T3 (período seco), que, aunque no mostró diferencias significativas con T1, fue lo suficientemente menor ($371,55 \pm 193,16 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$) como para no diferenciarse de las más bajas. Dentro de éstas, la menor fue T2 (período de lluvia), con $32,0 \pm 26,2 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$. Además, se puede apreciar una disminución de densidad con el tiempo, corroborándose a través de una correlación lineal de Pearson ($r = -0,43$; $p < 0,05$).

La disminución temporal de densidad media de la macrofauna edáfica, mostrada en la figura 27, parece estar asociada con la disminución en el tiempo ($p < 0,05$) de Pt ($r = -0,55$), Ksat ($r = -0,44$) y al aumento de Da ($r = 0,56$), las cuales también se relacionaron ($p < 0,05$) con la densidad (Pt: $r = 0,46$; Da: $r = -0,40$). Esto se corresponde con los resultados reportados por otros investigadores (Bottinelli et al., 2015; Lavelle et al., 2006; Moura et al., 2015) y se explica, pues al haber menor porosidad aumenta la densidad aparente ($r = -0,69$; $p < 0,05$) y disminuye la conductividad hidráulica ($r = 0,65$; $p < 0,05$), lo que afectaría negativamente el intercambio gaseoso y la infiltración del agua con nutrientes en el suelo, lo que a su vez desfavorece a las poblaciones de invertebrados presente en éste.

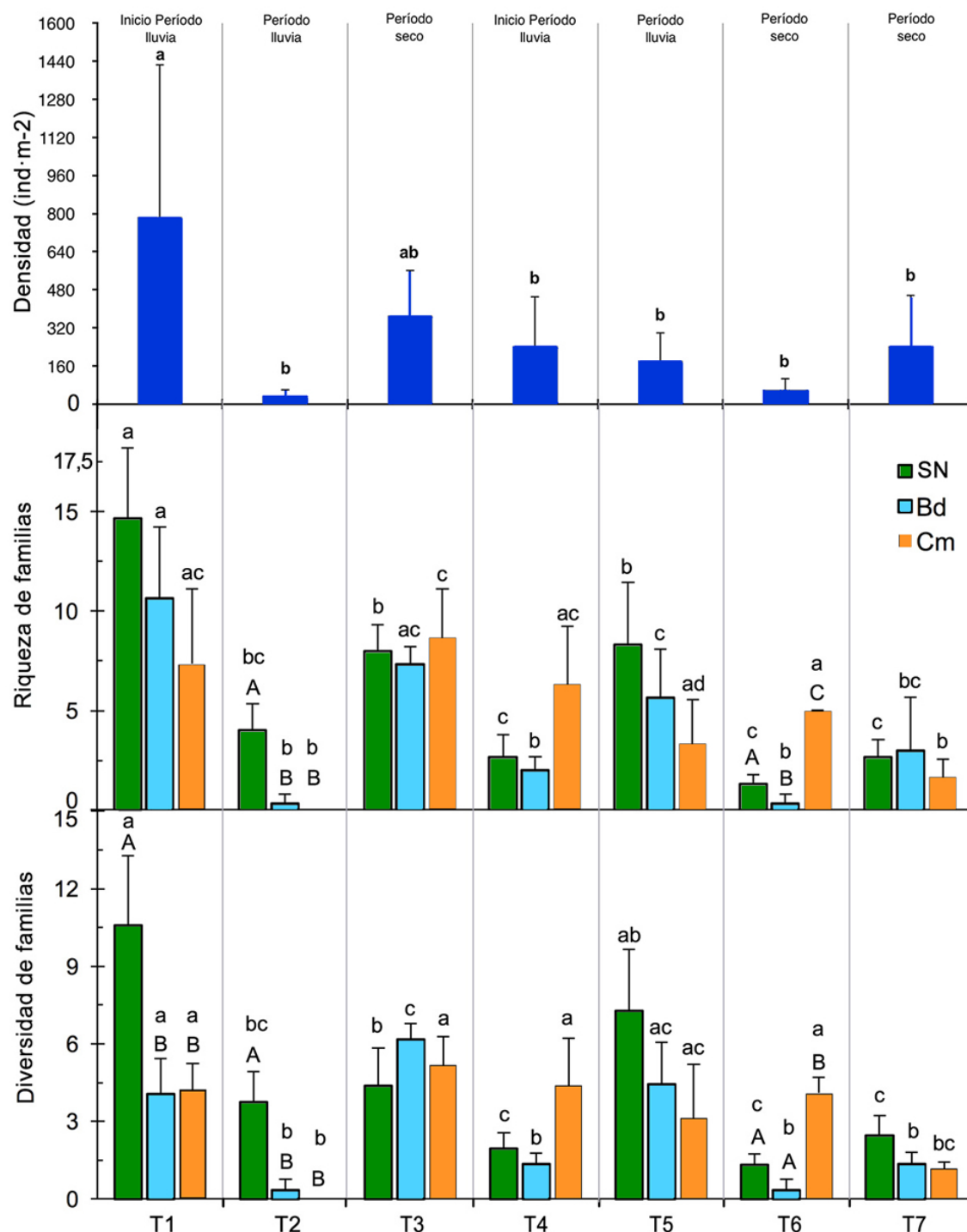


Figura 27. Densidad media de la comunidad de macroinvertebrados edáficos sin discriminar por coberturas, respecto tiempos de muestreo (parte superior); riqueza (parte media) y diversidad (parte inferior) de familias de los macroinvertebrados edáficos de una sabana natural (SN) y coberturas introducidas de *Brachiaria dictyoneura* (Bd) y *Centrosema macrocarpum* (Cm), por cada tiempo de muestreo. Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre cada cobertura vegetal en un mismo tiempo; letras minúsculas indican diferencias significativas entre tiempos de muestreo para una misma cobertura vegetal. Se indican los períodos meteorológicos.

En cuanto a la variación temporal de la riqueza de familias de macroinvertebrados edáficos en cada cobertura vegetal, la figura 27 muestra que esta variación, en SN no fue tan marcada como en Bd y Cm, aunque su valor inicial fue considerablemente alto ($14,5 \pm 3,05$ familias) respecto a los otros tiempos, siendo el menor de estos T6 (período seco), con $1,33 \pm 1,12$ familias. En el caso de la cobertura vegetal Bd, la variación temporal de la riqueza de familias tuvo un patrón de variación similar al de SN, aunque con valores menores en algunos tiempos, registrándose el mayor valor en T1 ($10,52 \pm 3,87$ familias) y el menor en T2 (período de lluvia) y T6, ambos con $0,35 \pm 0,33$ familias. En la cobertura vegetal Cm, a diferencia de SN y Bd, se registró el mayor valor de riqueza en T3, con $8,67 \pm 3,05$ familias, seguido de T1 ($7,10 \pm 2,8$ familias) y de T5 (período de lluvia), con $3,33 \pm 2,8$ familias, en T2 se registró cero (0) familias.

Por otro lado, al revisar la variación de la riqueza y diversidad de familias por cobertura vegetal para cada tiempo de muestreo, en la figura 27 se puede apreciar que, para la riqueza de familias, solo hubo diferencias en los tiempos T2 y T6 (período seco), mientras que la diversidad de familias, además de estos dos tiempos, también en T1 (inicio de lluvia). En T2, SN presentó los mayores valores ($p < 0,05$) de estos atributos (riqueza: $4,0 \pm 1,3$ familias y diversidad: $3,7 \pm 1,2$ familias) y en T1, de diversidad ($10,6 \pm 2,7$ familias).

Esta variación se puede relacionar con la alteración del suelo producto del establecimiento de las coberturas vegetales y del cultivo de maíz, lo cual pudo cambiar algunas propiedades edáficas claves para los

macroinvertebrados edáficos, por ejemplo, se registró un incremento significativo de P en las parcelas intervenidas en T1 (Bd: $5,30 \pm 3,96\%$ y Cm: $5,40 \pm 2,97\%$) y en T2 (Bd: $4,84 \pm 3,08\%$ y Cm: $7,95 \pm 2,60\%$) respecto a SN (T1: $0,75 \pm 0,42\%$; T2: $0,50 \pm 0,55\%$), lo cual también, fue referido por Ramírez (2015). Así, se puede explicar la relación negativa ($p < 0,05$) entre esta propiedad y los atributos ecológicos de la comunidad de los macroinvertebrados edáficos (densidad: $r = -0,77$; riqueza de familias: $r = -0,75$; diversidad de familias: $r = -0,76$), contrario a lo reportado por otros investigadores (Ochoa-Hueso et al., 2014; Vasconcellos et al., 2013), quienes sugieren que el fósforo en el suelo, hasta ciertas cantidades, puede favorecer a la macrofauna edáfica.

Además, la figura 27, muestra que en T6, la cobertura vegetal Cm, presentó los valores más elevados de riqueza (5,0 familias) y diversidad ($4,1 \pm 0,6$ familias). Esto pudo deberse a los bajos valores de CE en Cm ($p < 0,05$) ($47,05 \pm 6,57 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), respecto a SN ($58,90 \pm 7,60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) y Bd ($65,82 \pm 8,64 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Esto es contrario a lo reportado por Tao et al. (2016), quienes encuentran una relación positiva entre los macroinvertebrados edáficos y la CE del suelo. No obstante, esta relación negativa entre la macrofauna edáfica, como se refirió anteriormente, pudo ser generada por otras propiedades determinantes de la infiltración y retención del agua en el suelo, como la porosidad, densidad aparente del suelo. De hecho, para SN se registró correlación positiva entre Da y CE ($r = 0,45$; $p < 0,05$), mientras que para las coberturas Bd y Cm se tienen correlaciones negativas entre H y CE ($r > 0,51$; $p < 0,05$), y en Bd, entre Pt y P_{micro} con CE ($r < -0,62$; $p < 0,05$).

4.2.4. Efecto del manejo agrícola en la relación de la macrofauna del suelo con las propiedades edáficas



Figura 28. *Brachiaria dictyoneura* y vástagos de maíz en área de cultivo en época seca (febrero). Estación Experimental La Iguana, Guárico, Venezuela.

Foto: Hernández-Hernández, RM.

La relación entre las propiedades físico-químicas del suelo y los macroinvertebrados edáficos, fue afectada por el manejo agrícola. Esto se puede evidenciar en la tabla 12, donde se aprecia que mientras en SN hubo correlaciones entre la macrofauna y varias propiedades edáficas (Da, Pt, CE y P), en Bd no hubo y en Cm, solo P, se correlacionó con la diversidad de familias.

Tabla 12. Correlación lineal de Pearson (r) y sus valores p entre las variables edáficas y los atributos ecológicos: riqueza y diversidad de familias de los macroinvertebrados edáficos de las coberturas vegetales SN, Bd y Cm, y la densidad media del agroecosistema en la estación La Iguana. Densidad $n=126$; riqueza y diversidad de familias $n=42$.

Cobertura [†]	Atributo [‡]	Est [§]	Variable físico-química del suelo ^{††}									
			Da	% Pt	P _{macro}	P _{micro}	Ksat	%H	MOS	pH	CE	P
SN	RIQ	r	-0,50 [#]	0,52	0,02	0,22	0,36	-0,16	-0,15	-0,20	-0,33	-0,44
		p	0,02	0,01	0,93	0,33	0,10	0,47	0,51	0,38	0,14	0,04
	DIV	r	-0,47	0,35	-0,05	0,26	0,37	-0,08	-0,18	-0,17	-0,44	-0,49
		p	0,03	0,11	0,81	0,24	0,09	0,74	0,41	0,44	0,04	0,02
Bd	RIQ	r	-0,15	0,17	0,30	0,10	-0,01	-0,19	0,18	0,01	-0,03	0,02
		p	0,52	0,46	0,18	0,66	0,97	0,40	0,42	0,97	0,91	0,95
	DIV	r	-0,08	0,09	0,14	0,05	-0,11	-0,03	0,03	-0,06	0,07	0,03
		p	0,74	0,70	0,55	0,83	0,63	0,89	0,88	0,79	0,77	0,90
Cm	RIQ	r	-0,18	-0,11	-0,20	0,10	-0,32	-0,31	0,09	-0,14	-0,06	-0,25
		p	0,43	0,62	0,37	0,67	0,15	0,16	0,70	0,54	0,78	0,27
	DIV	r	-0,35	-0,08	0,06	-0,19	-0,10	-0,22	0,23	-0,19	-0,12	-0,43
		p	0,12	0,73	0,80	0,40	0,65	0,32	0,30	0,40	0,60	0,04
Agroecosistema	DEN	r	-0,12	0,08	-0,08	0,16	0,07	-0,19	0,25	-0,06	-0,07	-0,10
		p	0,36	0,52	0,54	0,21	0,59	0,12	0,04	0,63	0,57	0,41

[†]SN: Sabana Natural; Bd: cultivo de maíz asociado a *Brachiaria dyctioneura*; Cm: cultivo de maíz asociado a *Centrosema macrocarpum*; Agroecosistema: media de la densidad en SN, Bd y Cm

[‡]DEN: Densidad; RIQ: Riqueza de Familias; DIV: Diversidad de Familias.

[§]Estadístico: valor de r (correlación lineal de Pearson); valor p

[#]Números en rojo indican correlación significativa.

^{††}Da: densidad aparente; Pt: porosidad total; P_{macro}: macroporosidad; P_{micro}: microporosidad; Ksat: conductividad hidráulica; H: porcentaje de humedad; MOS: materia orgánica del suelo; CE: conductividad eléctrica; P: fósforo disponible

Los cambios encontrados en la tabla 12, respecto a las relaciones entre las propiedades edáficas y macrofauna del suelo, dependen de la cobertura vegetal. Esto se pudo deber a dos razones: por un lado, el manejo agrícola generó mayor heterogeneidad y por tal, la variabilidad enmascara posibles relaciones halladas en SN y, por otro lado, al hecho de que el manejo agrícola

generó alteraciones en los compartimientos biológicos y físico-químicos del suelo, lo que a su vez afecta las relaciones naturales entre estos (Chapin et al. 2011).

La densidad media de la macrofauna, no tiene un patrón de variación diferenciado entre coberturas, por lo que en la tabla 12, se muestran las correlaciones entre las propiedades del suelo y la media de la densidad del agroecosistema, resultando significativa la relación con MOS, lo que coincide con varios autores (Domínguez et al., 2010; Huerta y van der Wal, 2012), quienes reportan que la macrofauna del suelo es favorecida por la materia orgánica presente en el suelo, pues aparte de suministrar los nutrientes necesarios para su metabolismo y desarrollo, también incide en otras propiedades claves para la biota del suelo, como por ejemplo la humedad del suelo (Chapin et al., 2011).

Por otro lado, se evaluó la relación existente entre las propiedades edáficas y la densidad de las familias de macroinvertebrados del suelo, a través de un RDA (figura 29 y figura 30) que, sumando sus tres principales ejes, explicó un 81% de la varianza total.

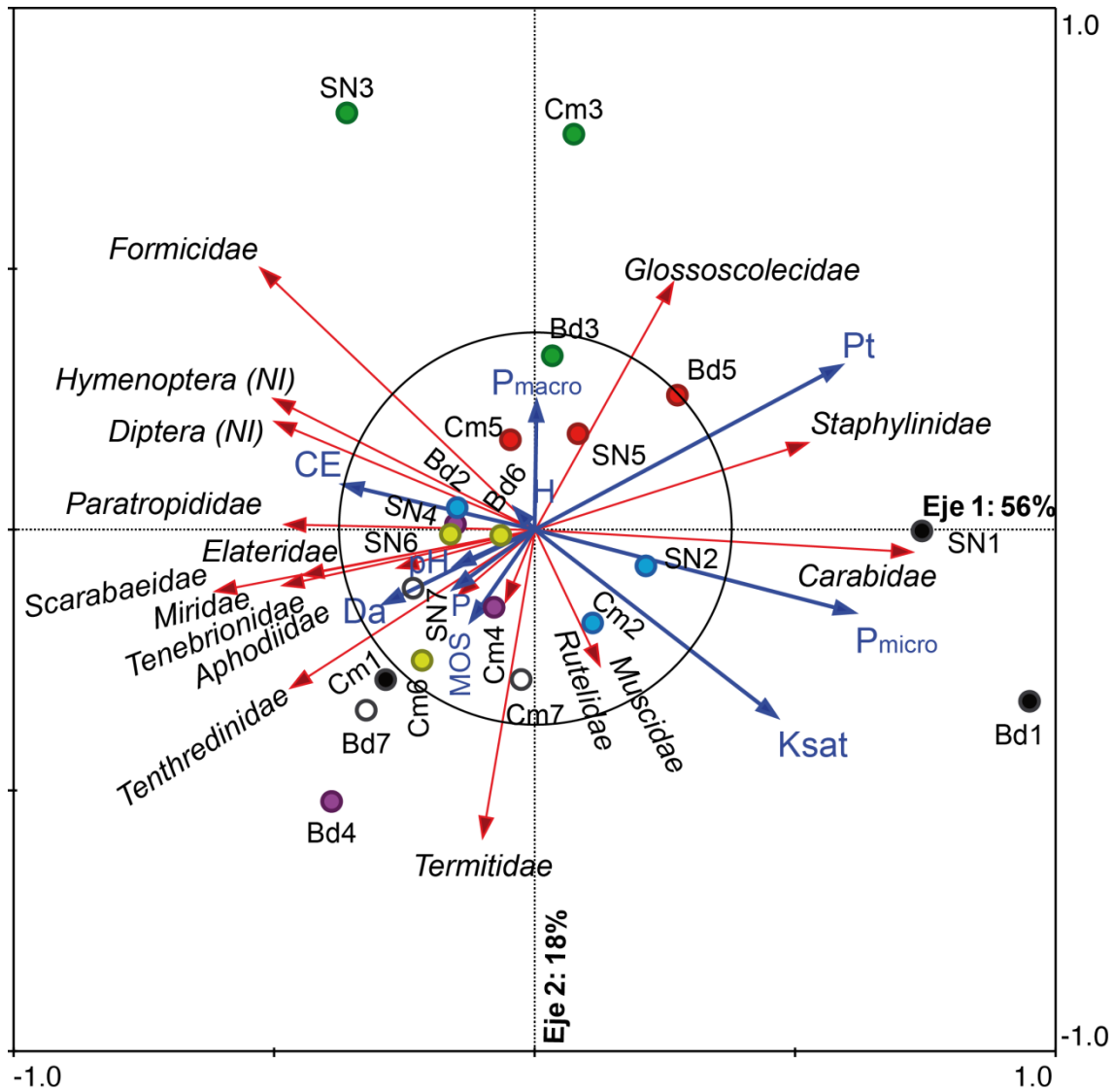


Figura 29. Ordenamiento de los sitios (sabana natural (SN), *Brachiaria dictyoneura* (Bd) y *Centrosema macrocarpum* (Cm) por tiempo de muestreo, en color), según la densidad de familias de la macrofauna (vector rojo) y su correlación con las propiedades del suelo (vector azul), a través de un RDA. Parte superior: eje 1 y 2, parte inferior: eje 2 y 3. Círculo central: valor mínimo de correlación ($r_s = 0,38$). Se consideraron familias con densidad mayor a 2 ind·m⁻². NI: No identificada. MOS: materia orgánica del suelo; CE: conductividad eléctrica; P: fósforo disponible; P_{macro}: macroporosidad; P_{micro}: microporosidad; Pt: porosidad total; Da: densidad aparente; H: humedad; Ksat: conductividad hidráulica.

En la figura 29, se puede apreciar que el primer eje fue determinado principalmente por Carabidae, Staphylinidae y en dirección opuesta por Scarabaeidae, Formicidae; el segundo por Glossoscolecidae, Formicidae y sentido opuesto por Termitidae. Por otro lado, la figura 30, muestra que el tercer eje fue determinado por Termitidae y Glossoscolecidae y en sentido opuesto por Tenthredinidae y Aphodiidae. También se puede observar que, por lo menos para estos tres ejes, la mayoría de los sitios tendieron a agruparse hacia el centro del ordenamiento, lo que indicaría cierta homogeneidad en cuanto a la densidad de las familias más importantes de la macrofauna.

Por otro lado, se puede apreciar en la figura 29 y 30 que, de acuerdo con el valor mínimo de correlación, las propiedades del suelo que se correlacionan con los ejes del RDA fueron Pt, P_{micro} , Ksat, CE y P (tabla 13).

Tabla 13. Correlación (r) de las propiedades físico-químicas del suelo con los ejes del RDA, formado a través de la densidad de las familias de los macroinvertebrados edáficos de un agroecosistema de sabana con cultivo de maíz asociado con coberturas vegetales en la Estación Experimental La Iguana. Valores en rojo indican correlación significativa ($p < 0,05$) para un $n = 21$.

Parámetro	Valor r_s		
	Eje 1	Eje 2	Eje 3
Densidad aparente (Da)	-0,29	-0,14	0,02
Porosidad total (Pt)	0,59	0,31	-0,32
Macro Porosidad (P_{macro})	0,00	0,24	-0,27
Micro Porosidad (P_{micro})	0,61	-0,16	-0,03
Conductividad hidráulica (Ksat)	0,46	-0,36	0,11
Humedad (H)	-0,04	0,04	-0,06
Materia orgánica de suelo (MOS)	-0,12	-0,17	-0,24
pH	-0,15	-0,07	-0,02
Conductividad Eléctrica (CE)	-0,36	0,09	0,64
Fósforo disponible (P)	-0,15	-0,11	0,43

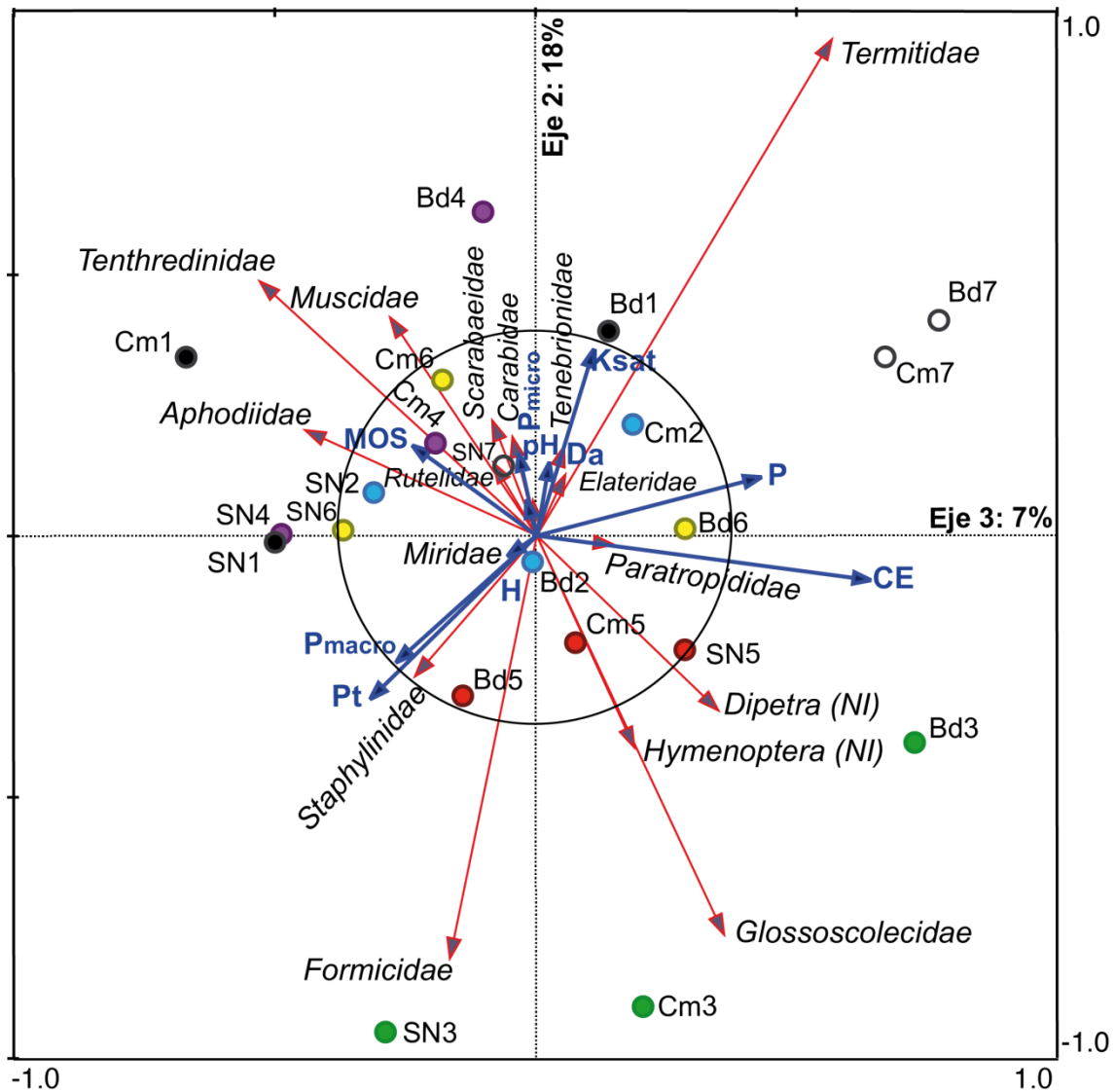


Figura 30. Ordenamiento de los sitios (sabana natural (SN), *Brachiaria dictyoneura* (Bd) y *Centrosema macrocarpum* (Cm) por tiempo de muestreo, en color), según la densidad de familias de la macrofauna (vector rojo) y su correlación con las propiedades del suelo (vector azul), a través de un RDA (ejes 2 y 3). Círculo central: valor mínimo de correlación ($r_s = 0,38$). Se consideraron familias con densidad mayor a $2 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$. NI: No identificada. MOS: materia orgánica del suelo; CE: conductividad eléctrica; P: fósforo disponible; P_{macro}: macroporosidad; P_{micro}: microporosidad; Pt: porosidad total; Da: densidad aparente; H: humedad; Ksat: conductividad hidráulica.

En la dimensión formada por los ejes 2 y 3 (figura 30), se puede apreciar que la mayoría de los tiempos de muestreo de SN se agruparon del lado negativo del eje 3 del RDA; lo que sugiere que, a través del tiempo, se tuvo una mayor homogeneidad en cuanto a macroinvertebrados edáficos que los sitios intervenidos agroecológicamente. Esto explicaría hasta cierto punto, los cambios en la estructura de la comunidad de macroinvertebrados edáficos entre la SN y las coberturas introducidas; lo que se corresponde con lo registrado por Bedano et al. (2016), los cuales reportan una mayor heterogeneidad microespacial en suelos bajo cultivo.

Con la información de la tabla 13 y la proximidad entre vectores de las variables que se correlacionaron significativamente y los vectores correspondientes a las familias de la comunidad de macroinvertebrados edáficos, tenemos que para el eje 1 y 2 del RDA (figura 29), Glossoscolecidae, Staphylinidae y Carabidae estuvieron relacionados positivamente con las propiedades del suelo Pt, P_{micro} y Ksat. Mientras tanto, en el eje 2 y 3 del RDA (figura 30), Formicidae se correlacionó con Pt, lo que se corresponde con lo reportado en varios trabajos (Bottinelli et al., 2010; Lavelle et al., 1994; Moura et al., 2015), donde asociaron la actividad de estas familias con el incremento de porosidad y por tal de Ksat.

En la dimensión formada por el eje 2 y 3 (figura 30), también se puede apreciar que las larvas de Diptera (NI), Hymenoptera (NI) y Termitidae, se correlacionan positivamente con P y CE, en consonancia con estudios anteriores (Rückamp, 2011; Tao et al., 2016; Umeh et al., 1999; Vasconcellos

et al., 2013), donde se encuentra una relación positiva de estas familias con CE y P.

Además, el RDA revela que el ordenamiento fue determinado por el tiempo de muestreo. Por ejemplo, el tiempo de muestreo 3 (T3: SN3, Bd3 y Cm3), se diferencia del resto, siendo más evidente en la parte negativa de la dimensión formada por los ejes 2 y eje 3 (figura 30). Estos sitios estuvieron asociados a la dominancia de Formicidae y Glossoscolecidae, y con baja densidad de Termitidae. En esa misma dirección, aunque más hacia el centro, se agruparon los sitios de T5, además de dos de los tres sitios muestreados en T1 y T7.

Por otro lado, el RDA evidencia que en la dimensión formada por el eje 1 y 2 (figura 29), los sitios SN1 y Bd1, se caracterizados por la dominancia de Carabidae y Staphylinidae, asociados a porcentajes relativamente altos de P_{micro} y Ksat. Mientras que en la dimensión formada por el eje 2 y 3 (figura 30), Cm7 y Bd7, estuvieron caracterizados por una dominancia de Termitidae y con altos contenidos de P. En esta misma dimensión, se puede apreciar que todos los puntos correspondientes a SN, se ordenaron hacia el lado negativo del eje 3, y la mayoría agrupado sobre el eje 2, caracterizado por una dominancia relativa de Aphodiidae y bajos contenidos de P y CE.

4.3. Efecto de los tratamientos de fertilización en la macrofauna edáfica



Figura 31. Cultivo de maíz y *Brachiaria dictyoneura* con dos tipos de fertilización. Lado izquierdo: sin fertilización, como control (BI0), y lado derecho de la imagen, fertilizado con roca fosfórica (BRF).

Foto: Hernández-Hernández, RM.

4.3.1. Efecto en la estructura de la comunidad de macroinvertebrados edáficos

Los tratamientos de fertilización aplicados al cultivo de maíz asociado a las dos coberturas vegetales, se diferenciaron por el tipo de fósforo utilizado y las proporciones de estos (RF: 100% roca fosfórica; IR: 50% de roca fosfórica+ 50% fósforo soluble; FB 25% de roca fosfórica + micorrizas), lo cual generó

diferencias en cuanto a la disponibilidad de fósforo en el tiempo; lo que a su vez produjo diferencias en la productividad en cada tratamiento (Castro, 2016; Hernández et al., 2011; Ramírez, 2015).

En la figura 32, que muestra la distribución de la abundancia relativa de los principales ordenes de la macrofauna edáfica en cada tratamiento de fertilización, se puede ver que la estructura de sus comunidades también fue afectada por estos tratamientos de fertilización. Las comunidades más equitativas, fueron las presentes en la cobertura Cm con tratamiento control (I0) (CI0) y fertilización biológica (CFB) y la cobertura Bd con I0 (BI0) y roca fosfórica (RF) (BRF). Mientras las menos equitativas, fueron las presentes en Cm con RF (CRF) y Bd con FB (BFB). En todos los tratamientos, los ordenes más dominantes, fueron Isoptera, seguido de Hymenoptera y Coleoptera. Dentro de estos dos últimos, hubo algunas alternancias de dominancia, en los tratamientos BRF, BFB, BI0 y en CIR.

La dominancia de Isoptera e Hymenoptera, mostrada en la figura 32, como se explicó anteriormente, pudo deberse a mayores contenidos de MOS producto de la necromasa sobre y dentro del suelo (Lavelle et al., 2003), que incrementó en los tratamientos con mayores nutrientes (Castro, 2016). Esto explicaría también, una mayor equidad entre ordenes en CI0 y BI0, ya que los contenidos de necromasa en el suelo no fue lo suficientemente alta como para favorecer a Isoptera e Hymenoptera (Bedano et al., 2016). Esta explicación también pudiera darse para la presencia/ausencia de familias de macroinvertebrados edáficos en algunos tratamientos de fertilización (tabla 14).

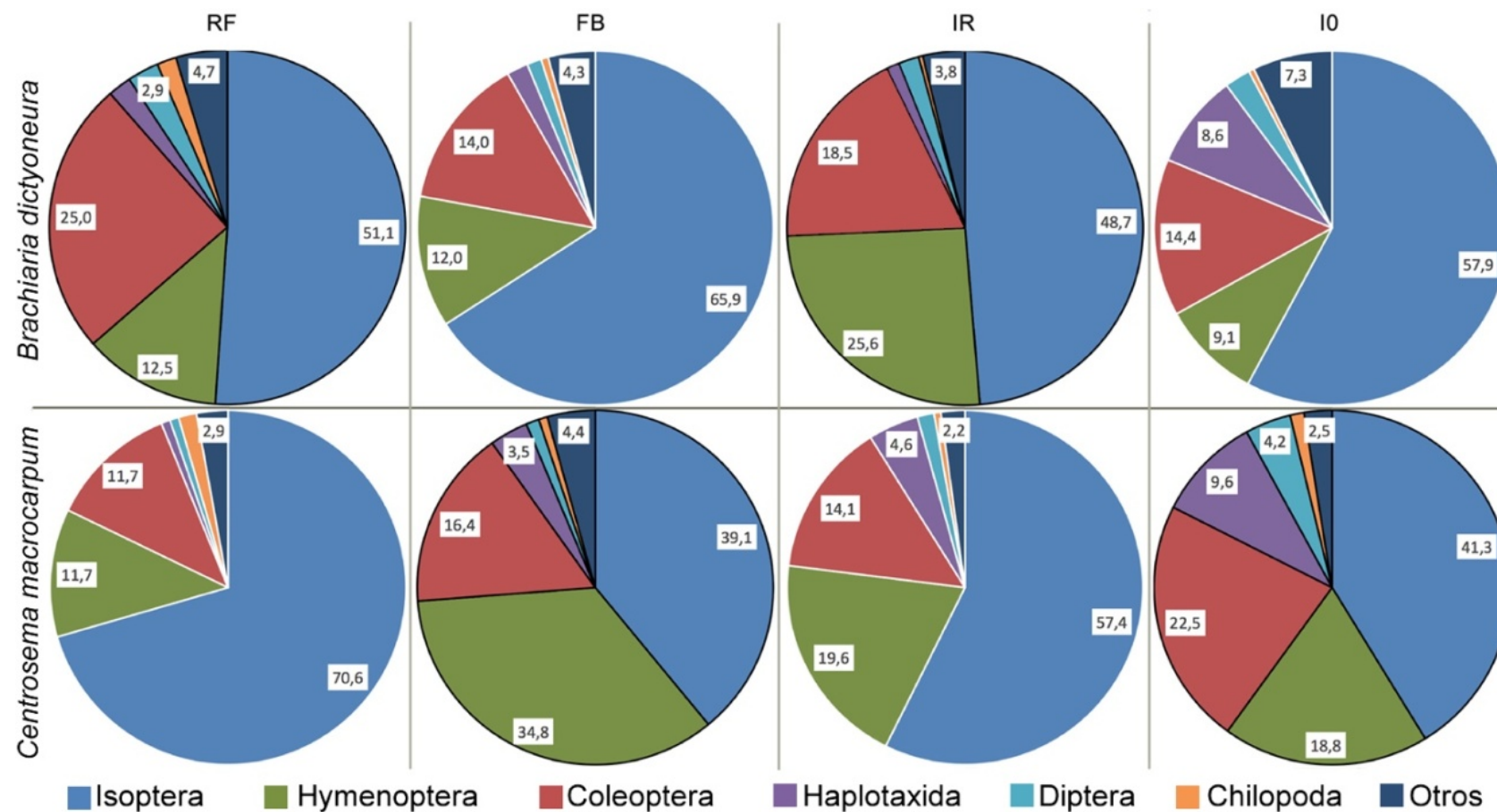


Figura 32. Abundancia relativa (%) de los ordenes de la macrofauna edáfica por cobertura de vegetal: cultivo de maíz asociado con *Brachiaria dictyoneura* y con *Centrosema macrocarpum* y sus tratamientos de fertilización (RF: roca fosfórica; FB: fertilización biológica; IR: fósforo diamónico+roca fosfórica; IO: control). Cada color indica un taxón. Otros: Araneae; Homoptera, Chilopoda, Solifugae, Blattodea, Lepidoptera, Orthoptera y Psocoptera, con abundancia relativa menor a 1%.

En la tabla 14, se puede apreciar que existe diferencias entre tratamiento de fertilización, en cuanto a presencia/ausencia de familias y densidades de cada una por tratamiento. Por ejemplo, Aphodiidae (Coleoptera) estuvo ausente en la cobertura BFB, mientras estuvo presente en el resto de tratamientos, aunque con diferentes densidades; Pentatomidae (Isoptera), solo estuvo presente en BI0, lo mismo Catopidae (Coleoptera) presente solo en CIR; mientras, Lygaeidae (Hemiptera) estuvo presente en todos los tratamientos de fertilización de la cobertura Bd, mientras en la cobertura Cm solo estuvo presente en el tratamiento de fertilización IR.

A pesar de estas diferencias entre tratamientos, respecto a la estructura de la comunidad de la macrofauna del suelo, cuando se suma la densidad de todas las familias, y se revisa la media de la riqueza y diversidad de familias por tratamiento en la tabla 14, se puede apreciar que no hay mayores diferencias entre sí, de hecho, el análisis de varianza confirma esta observación (densidad en tratamientos de Bd: $F = 0,26$; $p = 0,85$; de Cm: $F = 0,22$; $p = 0,88$; riqueza, Bd: $F = 1,47$; $p = 0,23$; Cm: $F = 0,66$; $p = 0,56$; diversidad, Bd: $F = 1,18$; $p = 0,33$; Cm: $F = 0,68$; $p = 0,57$).

Así mismo, al promediar los valores de cada atributo en los tratamientos dentro de las coberturas, comparándolas entre sí, tampoco se diferenciaron (densidad: $F = 0,001$; $p = 0,98$; riqueza: $F = 0,32$; $p = 0,57$; diversidad de familias: $F = 0,07$; $p = 0,80$).

Tabla 14. Densidad media (ind·m⁻²) de las familias, y media de la densidad, riqueza y diversidad de las comunidades de los macroinvertebrados edáficos de los cultivos de maíz asociados con *Brachiaria dictyoneura* (Bd) y *Centrosema macrocarpum* (Cm), con diferentes tratamientos de fertilización, en la Estación Experimental La Iguana.

Orden	Familia	Tratamientos de Fertilización [†]							
		BRF	BFB	BIR	BI0	CRF	CFB	CIR	CI0
Ind·m ⁻²									
Isoptera	Termitidae	127,1 (43,6) [‡]	180,4 (150,6)	114,7 (108,9)	106,7 (98,6)	155,6 (120,2)	88,9 (74,3)	166,2 (163,0)	88,0 (77,8)
	Pentatomidae	0	0	0	0,9 (0,5)	0	0	0	0
Hymenoptera	Formicidae	23,1 (22,5)	26,7 (17,8)	60,4 (53,4)	15,1 (13,3)	24,9 (22,1)	75,6 (72,1)	52,4 (47,9)	30,2 (22,5)
	Hym (NI) [§]	4,4 (3,9)	4,4 (3,9)	0	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	1,8 (1,4)	2,7 (2,6)	5,3 (5,1)
	Tenthredinidae	3,6 (3,6)	1,8 (1,5)	0	0,9 (0,5)	0	1,8 (1,5)	1,8 (1,4)	4,4 (3,4)
Coleoptera	Aphodiidae	7,1 (7,1)	1,8 (1,5)	0	1,8 (1,5)	1,8 (1,5)	7,1 (6,9)	7,1 (6,9)	9,8 (9,5)
	Carabidae	11,6 (6,2)	8,9 (8,3)	1,8 (1,5)	8,0 (5,3)	1,8 (1,5)	1,8 (1,5)	10,7 (7,1)	12,4 (8,9)
	Catopidae	0	0	0	0	0	0	0,9 (0,5)	0
	Chrysomelidae	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	1,8 (1,5)	0	0	3,6 (3,6)	0	1,8 (1,5)
	Cicindelidae	0	0	0,9 (0,5)	0	0	0	0	0
	Coccinellidae	0	0,9 (0,5)	0	0	0	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	0
	Curculionidae	0	0	0	0,9 (0,5)	0	0	0	0
	Elateridae	0,9 (0,5)	4,4 (4,4)	5,3 (5,3)	0,9 (0,5)	6,2 (6,5)	3,6 (3,6)	10,7 (10,7)	1,8 (1,5)
	Hydroscaphidae	0	0	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	1,8 (1,5)	1,8 (1,5)	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)
	Miridae	1,8 (1,5)	0,9 (0,5)	1,8 (1,5)	0	0	4,4 (4,4)	1,8 (1,5)	4,4 (4,4)
	Rutelidae	0,9 (0,5)	0	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	0	0	0	1,8 (1,5)
	Scarabaeidae	23,1 (22,1)	11,6 (8,0)	14,2 (10,7)	6,2 (5,5)	8,0 (5,3)	3,6 (2,7)	0,9 (0,5)	4,4 (4,4)
	Staphylinidae	8,0 (7,8)	4,4 (3,0)	5,3 (4,1)	4,4 (4,4)	0,9 (0,5)	6,2 (4,7)	3,6 (3,6)	8,0 (7,5)
	Tenebrionidae	8,0 (7,1)	4,4 (4,4)	10,7 (8,9)	2,7 (2,6)	5,3 (4,1)	4,4 (4,4)	3,6 (3,6)	2,7 (2,1)
Haplotaenidia	Glossoscolecidae	5,3 (3,6)	5,3 (3,6)	2,7 (2,7)	16,0 (15,4)	1,8 (1,5)	8,0 (7,1)	13,3 (13,3)	20,4 (16,6)
Diptera	Cecydomidae	0	0	0	0	0	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	0
	Dip (NI)	0	1,8 (1,5)	0	3,6 (3,1)	0	0	0,9 (0,5)	2,7 (2,1)
	Muscidae	3,6 (3,6)	0	4,4 (4,4)	0	1,8 (1,5)	0	1,8 (1,5)	3,6 (3,1)
	Sciaridae	3,6 (3,1)	0,9 (0,5)	0	0,9 (0,5)	0	1,8 (1,5)	0	2,7 (2,1)
	Tipulidae	0	0,9 (0,5)	0	0	0	0	0,9 (0,5)	0
Chilopoda	Cryptopidae	4,4 (3,9)	1,8 (1,5)	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	3,6 (3,1)	1,8 (1,5)	1,8 (1,5)	1,8 (1,5)
	Scolopendridae	0	0	0	0	0	0	0	0,9 (0,5)
Araneae	Dipluridae	0	1,8 (1,5)	0	0,9 (0,5)	0	0,9 (0,5)	0	0
	Paratropididae	1,8 (1,5)	1,8 (1,5)	0,9 (0,5)	1,8 (1,5)	1,8 (1,5)	0	0	2,7 (2,1)
	Salticidae	0	0	0,9 (0,5)	0	0	1,8 (1,5)	0	0
Hemiptera	Lygaeidae	2,7 (2,1)	1,8 (1,5)	0,9 (0,5)	3,6 (3,1)	0	0	1,8 (1,5)	0
	Reduviidae	0	0	1,8 (1,5)	0	0	0,9 (0,5)	0	0
Blattodea	Blattellidae	2,7 (2,1)	1,8 (1,5)	0	0,9 (0,5)	1,8 (1,5)	0,9 (0,5)	3,6 (3,1)	1,8 (1,5)
Homoptera	Cercopidae	0	0,9 (0,5)	3,6 (3,1)	3,6 (3,1)	0,9 (0,5)	1,8 (1,5)	0	0,9 (0,5)
Psocoptera	Psocidae	4,4 (3,0)	0,9 (0,5)	0	0,9 (0,5)	0	0	0	0
Lepidoptera	Pieridae	0	0,9 (0,5)	0	0	0	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	0
	Riodinidae	0	0	0	0	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	0	0
Solifugae	Ammotrechidae	0	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	0,9 (0,5)	0	0
Diplopoda	Polydesmidae	0	0,9 (0,5)	0	0	0	0,9 (0,5)	0	0
Orthoptera	Gryllotalpidae	0	0	0	0,9 (0,5)	0	0	0	0
Densidad		248,9 (94,2)	273,8 (219,3)	235,6 (207,7)	185,8 (120,3)	220,4 (244,7)	227,6 (151,1)	289,8 (139,9)	213,3 (129,8)
Familias									
Riqueza		10,0 (3,3)	9,5 (3,7)	7,7 (2,6)	7,2 (4,8)	6,0 (4,3)	9,0 (4,3)	7,3 (3,4)	8,2 (4,4)
Diversidad		4,9 (1,3)	6,5 (3,6)	5,8 (1,9)	4,1 (3,6)	4,2 (3,2)	7,1 (3,7)	3,9 (3,2)	6,1 (3,5)

[†] B: Bd; C: Cm; RF: roca fosfórica; FB: fertilización biológica; IR: fósforo diamónico+roca fosfórica; I0: control

[‡] Desviación estándar

[§] Larva no identificada.

Dada la similitud de los valores de cada atributo ecológico por tratamiento, presentados en la tabla 14, se puede inferir que, en esta oportunidad, el enmascaramiento que genera la variabilidad de los datos no jugó un papel preponderante, como en otros casos. Esto se puede explicar tomando en cuenta que, a nivel de familia, hubo una redistribución de la densidad. A simple vista, se puede apreciar que en los tratamientos donde estuvo ausente alguna familia, ese espacio fue ocupado por otra, o donde hubo una reducción de la densidad de una familia, fue compensado con el incremento de la densidad de otra familia. Este proceso natural, para otras formas de vida, denominado *continuum* (McIntosh, 1967), de reemplazo de una familia por otra o la compensación de la densidad de una con otra familia, es la razón por la cual, Santorufo et al. (2012), sugieren que los indicadores de calidad, basados solo en la riqueza y diversidad de familias, no son un buen indicador de la calidad del suelo.

4.3.2. Efecto de la fertilización en la variación temporal de la macrofauna edáfica

Evalutando el efecto de los tratamientos de fertilización sobre la macrofauna en el gradiente temporal, a través del análisis de varianza de dos vías, se pudo comprobar que, tanto para los tratamientos de Bd y Cm, no hubo interacción entre las categorías “tratamiento de fertilidad” y “tiempo de muestreo”, cuando se consideraron los atributos ecológicos de la comunidad de los macroinvertebrados edáficos (tabla 15).

Tabla 15. Resumen de los efectos del análisis de varianza de dos vías para la interacción entre factores "tiempos de muestreo" y "tratamiento de fertilización" para el cultivo de maíz asociado con la cobertura vegetal *Brachiaria dictyoneura* (Bd) y *Centrosema macrocarpum* (Cm), utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.

Cobertura vegetal	Atributo ecológico	SS	Grados de libertad	MS	F	<i>p</i>
Bd	Densidad	1680000,0	15,0	112000,0	1,73	0,08
	Riqueza	59,1	15,0	3,9	1,00	0,47
	Diversidad	28,6	15,0	1,9	0,84	0,64
Cm	Densidad	1210000,0	15,0	80800,0	1,15	0,34
	Riqueza	130,3	15,0	8,7	1,87	0,05
	Diversidad	72,0	15,0	4,9	1,53	0,13

Por otro lado, tampoco se encontraron interacciones entre tiempo y cobertura vegetal ($p > 0,05$) ni entre este factor y tratamiento de fertilización, con ningún atributo ecológico (tabla 16).

Tabla 16. Resumen de los efectos del análisis de varianza de dos vías para la interacción entre factores "cobertura vegetal" (COV) y "tratamiento de fertilización" (TRAT), y entre los factores "tiempo de muestreo (Tiempo) y COV, utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.

Efecto	Atributo ecológico	SS	Grados de libertad	MS	F	<i>p</i>
COV*TRAT	Densidad	60200,00	3,0	20100,00	0,21	0,89
	Riqueza	46,72	3,0	15,57	1,80	0,15
	Diversidad	21,64	3,0	7,22	1,42	0,24
Tiempo*COV	Densidad	132000,00	5,0	26500,00	0,37	0,87
	Riqueza	26,7	5,0	5,3	1,08	0,38
	Diversidad	17,8	5,0	3,56	1,20	0,31

En tal sentido, se analizó la variación temporal de estos atributos, sin discriminar por tratamiento de fertilización ni por cobertura vegetal. En la figura 33, se revela la variación temporal de los atributos ecológicos de la comunidad de macroinvertebrados edáficos del agroecosistema, donde se evidencia que existieron diferencias entre tiempos de muestreos respecto cada atributo ecológico de la macrofauna del suelo (tabla 17).

Tabla 17. Resumen de los efectos del análisis de varianza para la comparación entre tiempos de muestreo, utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.

Atributo ecológico	SS	Grados de libertad	MS	F	<i>p</i>
Densidad	3750000,00	5,00	749000,0	10,69	0,000
Riqueza	548,40	5,00	109,7	22,10	0,000
Diversidad	311,00	5,00	62,2	21,03	0,000

En este sentido, la figura 33 revela que el inicio del estudio (T1) presenta uno de los valores más bajos para los tres atributos de la comunidad de macroinvertebrados edáficos (densidad: $41,3 \pm 27,5 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$; riqueza: $1,6 \pm 0,9$ familias; diversidad: $1,4 \pm 0,8$ familias). Esto se pudo deber a que, en ese momento, solo habían transcurrido 76 días del inicio del cultivo, lo que seguramente implicó un impacto por la siembra del maíz y por la aplicación de los tratamientos de fertilización del suelo sobre la macrofauna del suelo; lo que se corresponde con la observación en trabajos previos (Cabrera, 2012; Gholami et al., 2016; Lavelle et al., 1997; Wolters y Eckschmitt, 1997), donde se indica que el impacto del manejo agrícola sobre la macrofauna del suelo, disminuye la cantidad de individuos de las especies, a tal punto que, algunas,

podieran desaparecer temporal o permanentemente del suelo afectado, disminuyendo de esta manera, la riqueza y diversidad de la comunidad de macroinvertebrados edáficos, y así mismo su actividad y función ecológica dentro del ecosistema.

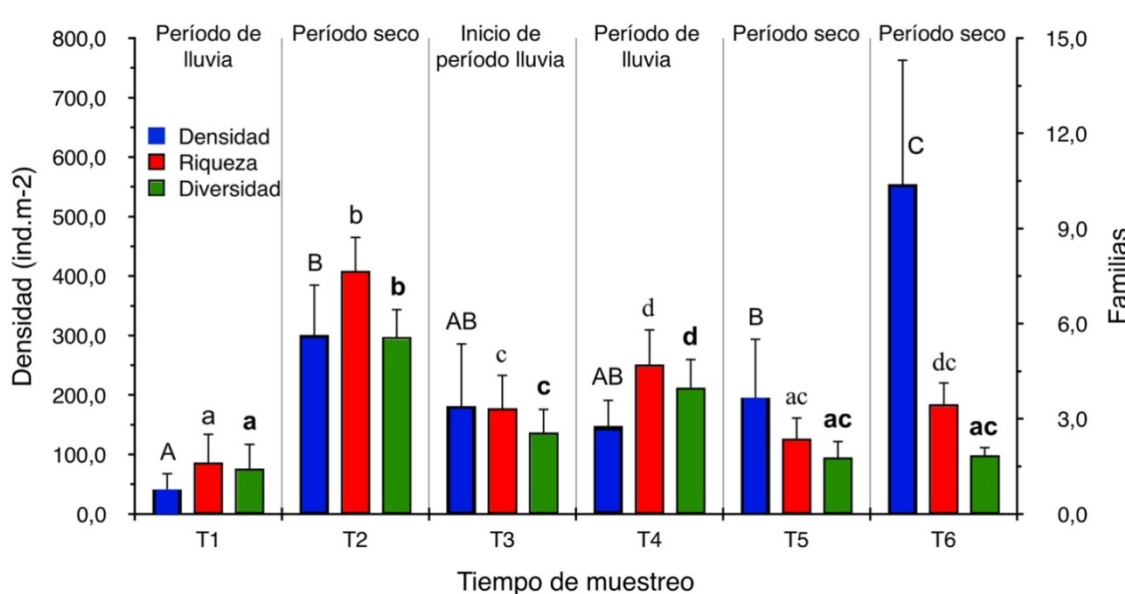


Figura 33. Densidad, riqueza y diversidad de familias de los macroinvertebrados edáficos del agroecosistema maíz con coberturas de *Brachiaria dictyoneura* y *Centrosema macrocarpum* y sus tratamientos de fertilización, en la Estación Experimental La Iguana, para cada tiempo de muestreo (Tx). Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) para la densidad; letras minúsculas desiguales indican diferencias significativas para la riqueza de familias y letras minúsculas en negritas para la diversidad de familias. Se indica el período climático.

No obstante, se puede apreciar en la figura 33, que T2 (período seco) presenta los valores más altos para la riqueza ($7,7 \pm 1,1$ familias) y diversidad de familias ($5,6 \pm 0,9$) y el segundo más alto para la densidad ($301,3 \pm 84,6$ ind·m⁻²). Esto se pudo deber a una rápida colonización de macroinvertebrados

e incremento de sus poblaciones, producto del aumento de recursos alimenticios (Decaëns et al., 2003b), estimulado indirectamente por la fertilización, que, como se refirió anteriormente, aumenta la productividad del agroecosistema, generando una mayor biomasa, consecuentemente, necromasa, y así, un mayor aporte de nutrientes al sistema (Zhu y Zhu, 2015).

En la figura 33, se puede apreciar también que a partir de T2, los patrones de variación de la riqueza y diversidad de familias de los macroinvertebrados edáficos son similares, mientras que la densidad presenta una variante en T6 (período de sequía), con un incremento significativo, alcanzando los $554,7 \pm 209,7 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$. Estas diferenciaciones por períodos climáticos hacen suponer una incidencia considerable de estos sobre la macrofauna del suelo.

En tal sentido, se evaluaron posibles interacciones entre los factores “período climático”, “cobertura vegetal” y “tratamiento de fertilización”, a través de un análisis de varianza de dos vías, resultando que no hubo interacciones entre estos (tabla 18), por lo que se compararon los períodos climáticos, a través de un análisis de varianza, respecto la densidad media de la comunidad de macroinvertebrados edáficos, su riqueza y diversidad (figura 34).

Tabla 18. Resumen de los efectos del análisis de varianza de dos vías para la interacción entre factores "período climático" (Período), "cobertura vegetal"(COV) y "tratamiento de fertilización" (TRAT), utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.

Efecto	Atributo ecológico	SS	Grados de libertad	MS	F	p
Período*TRAT	Densidad	407000,00	6,00	67900,00	0,82	0,56
	Riqueza	23,78	6,00	3,96	0,46	0,84
	Diversidad	8,87	6,00	1,48	0,28	0,95
Período*COV	Densidad	60200,00	2,00	30100,00	0,37	0,70
	Riqueza	4,14	2,00	2,07	0,25	0,78
	Diversidad	1,20	2,00	0,60	0,12	0,89
COV*TRAT	Densidad	60200,00	3,00	20100,00	0,21	0,89
	Riqueza	46,72	3,00	15,57	1,80	0,15
	Diversidad	21,64	3,00	7,22	1,42	0,24

En la figura 34 se puede observar que existe diferencia significativa entre los períodos climáticos respecto a la media de la densidad y de la riqueza de familias de la comunidad de macroinvertebrados del suelo. No obstante, cuando se compararon, usando la diversidad de familias de estos invertebrados, no presentaron diferencias entre sí (tabla 19).

Tabla 19. Resumen de los efectos del análisis de varianza para la comparación entre tiempos de muestreo, utilizando la densidad media de la macrofauna del suelo, su riqueza y diversidad de familias.

Atributo ecológico	SS	Grados de libertad	MS	F	p
Densidad	1970000,00	2,00	987000,00	12,16	0,00
Riqueza	59,22	2,00	29,61	3,56	0,03
Diversidad	6,46	2,00	3,23	0,64	0,53

Como se infirió anteriormente, los cambios generados en las propiedades del suelo por los períodos climáticos, tienen una fuerte incidencia sobre los macroinvertebrados edáficos. De esta manera, se puede apreciar, en la figura 34, que en el período seco se presentaron los valores más altos de densidad ($350,5 \pm 86,0 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$) y riqueza ($4,5 \pm 0,71$ familias) de la macrofauna del suelo, respecto al inicio de lluvias (densidad = $181,3 \pm 105,9 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$; riqueza = $3,3 \pm 1,1$ familias) y período de lluvia (densidad = $94,7 \pm 29,5 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$; riqueza = $3,2 \pm 0,8$ familias).

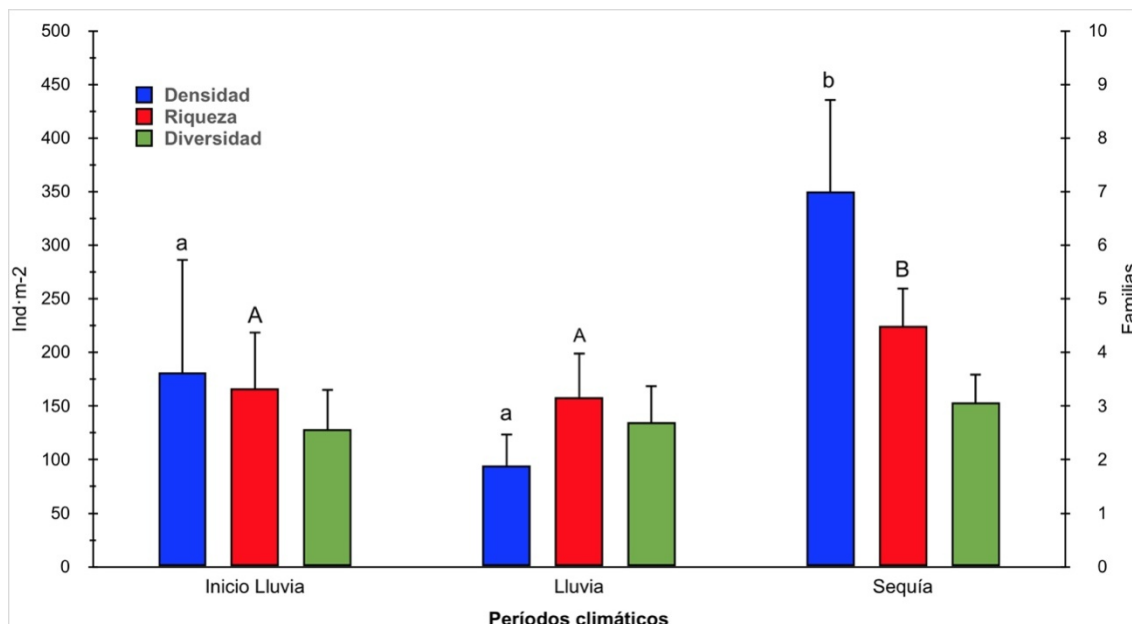


Figura 34. Densidad, riqueza y diversidad de familias de los macroinvertebrados edáficos del agroecosistema maíz con coberturas de *Brachiaria dictyoneura* y *Centrosema macrocarpum* y sus diferentes tratamientos de fertilización, en la Estación Experimental La Iguana, para cada período climático. Letras minúsculas desiguales indican diferencias significativas ($p < 0,05$) para la densidad; letras mayúsculas desiguales indican diferencias para la riqueza de familias.

Este incremento en la media de la densidad y de la riqueza de familias de la comunidad de macroinvertebrados del suelo, en los períodos secos, aunque contrario a lo esperado, dadas las condiciones limitantes que se puede tener en este período (por ejemplo de humedad), se puede explicar, considerando que los muestreos en los períodos secos, se realizaron inmediatamente después del pastoreo controlado del ganado, hecho que pudo incrementar los nutrientes en el suelo debido al estiércol y orina del ganado (Hernández et al., 2011), lo que a su vez pudo aumentar directa e indirectamente los recursos alimenticios de los macroinvertebrados edáficos (Decaëns et al., 2003b).

4.3.3. Efecto de la fertilización en la relación propiedades del suelo y macrofauna edáfica

Se pudo evidenciar que la relación entre los atributos ecológicos de la macrofauna edáfica y las propiedades del suelo, fue afectada por la cobertura vegetal introducida y sus tratamientos de fertilización. En la tabla 20 se revela que existe una diferenciación en estas relaciones, dependiendo de la cobertura vegetal, independiente de la fertilización, y también por fertilización. Como ejemplos, se tienen que, por un lado, en BI0 se presenta correlaciones entre la densidad de la macrofauna edáfica y tres propiedades del suelo, mientras que en BFB no se presentaron correlaciones significativas; por otro lado, para el tratamiento RF, la cobertura Bd registró correlación entre P_{micro} y la diversidad de familias de la macrofauna; mientras que, para este mismo tratamiento, en la cobertura Cm, solo hubo relación entre la densidad de la macrofauna y CE.

El efecto que la cobertura vegetal genera, independiente de su tratamiento de fertilización, está dado principalmente por las características biológicas y ecológicas de cada una. Por ejemplo, Bd, presenta un sistema radicular muy desarrollado, fibroso y denso, que genera mayor estabilidad al suelo (Lozano et al., 2010b; Vera et al., 2012), mayor retención de agua y recursos alimenticios a la biota; mientras que Cm, fija nitrógeno atmosférico al suelo y su biomasa, también acumula mayor fósforo (Ramírez, 2015), lo que brinda un material vegetal más rico para los macroinvertebrados.

Tabla 20. Correlación lineal de Pearson entre las propiedades del suelo y los atributos ecológicos (Den: densidad; RIQ: riqueza; Div: diversidad de familias) de la comunidad de macroinvertebrados edáficos de los cultivos de maíz asociados con *Brachiaria dictyoneura* (Bd) y *Centrosema macrocarpum* (Cm), con diferentes tratamientos de fertilización (n = 36) y la media en el agroecosistema (n = 288) en la Estación Experimental La Iguana. Se presentan solo los atributos ecológicos y las propiedades edáficas que se correlacionaron.

Tratamiento	Atributo	Propiedades edáficas				
		Da	Pt	P _{micro}	CE	P
Bd + RF (BRF) [†]	Div	0,04	-0,07	-0,47 [‡]	0,15	0,05
Bd + FB (BFB)	-	-	-	-	-	-
Bd + IR (BIR)	Den	0,37	-0,43	-0,38	0,66	0,49
Bd + I0 (BI0)	Den	0,52	-0,64	-0,42	0,61	-0,10
Cm + RF (CRF)	Den	0,00	-0,29	0,05	0,48	-0,37
Cm + FB (CFB)	Den	0,57	-0,28	-0,10	0,79	-0,47
Cm + IR (CIR)	Den	0,41	-0,24	-0,20	0,71	0,16
Cm + I0 (CI0)	Den	0,32	-0,56	0,00	0,60	-0,34
	Riq	0,09	-0,48	-0,10	0,33	-0,43
Agroecosistema	Den	0,31	-0,23	-0,17	0,50	-0,03

[†] RF: 100% roca fosfórica; FB: 25% roca fosfórica + fertilización biológica; IR: 50% fósforo diamónico + 50% roca fosfórica; I0: control

[‡] Números en rojo indican correlación significativa (p < 0,05).

En la tabla 20, se puede apreciar que la densidad de la macrofauna del suelo, fue el atributo ecológico que más correlaciones significativas presentó con las propiedades edáficas, y dentro de estas, fue CE la que más incidencia tuvo en los diferentes tratamientos. Lo señalado está en concordancia con lo encontrado en estudios anteriores (Joschko et al., 2010; Tao et al., 2016), donde se evidencia una relación estrecha entre la macrofauna edáfica y CE.

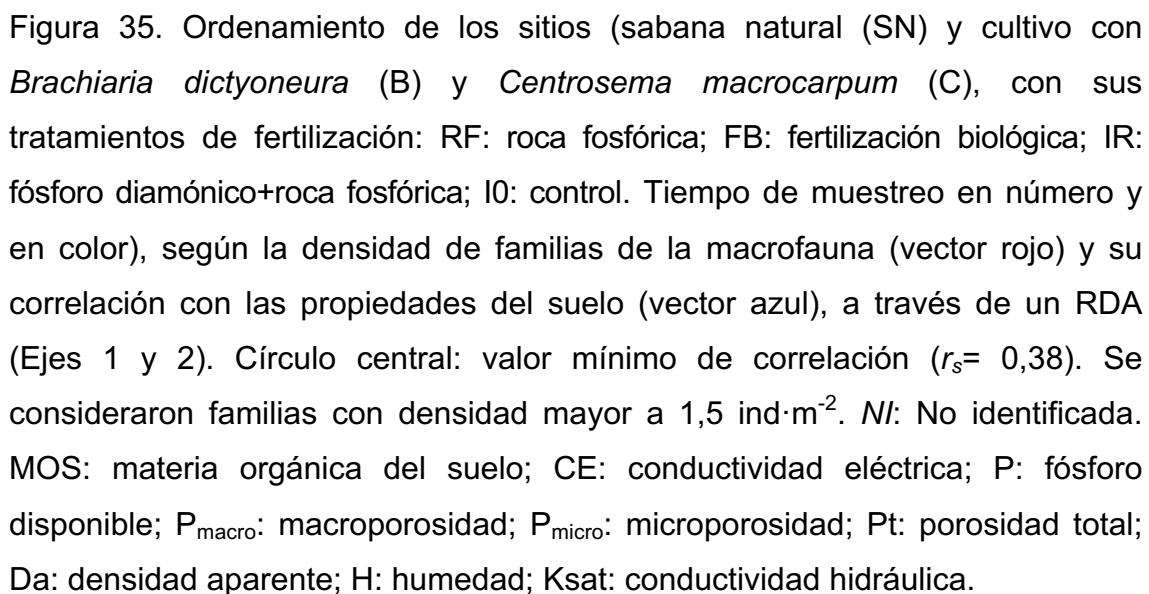
En la tabla 20, además, se puede apreciar que en el tratamiento de fertilización BIR, la CE y el P se correlacionaron positivamente con la densidad, y esto pudo ser de manera directa e indirecta: directamente, debido a que el P es un elemento necesario para el metabolismo de los organismos y, al respecto, se ha documentado que beneficia la macrofauna (Vasconcellos et al., 2013); indirectamente, ya que, este tratamiento introduce fósforo en 50% de forma soluble y una forma poco soluble (roca fosfórica), lo cual implicó una alta disponibilidad de fósforo para las plantas al inicio del cultivo y luego lentamente, manteniendo la productividad del agroecosistema en el tiempo (Chapin et al., 2011; Rückamp, 2011; Vitousek et al., 2010), lo que genera una mayor disponibilidad de recursos a la macrofauna del suelo en el tiempo.

Además, en la tabla 20, se registra una relación positiva entre Da y la densidad de la macrofauna del suelo en el tratamiento control de Bd (BI0) y del tratamiento Cm + FB (CFB), así como una relación negativa con Pt en BI0 y en el tratamiento Cm control (CI0), donde también se correlacionó negativamente con la riqueza de familias. Aunque, es un hecho contrario a lo esperado, Lozano et al. (2010b) encuentra en este mismo ensayo, que el efecto del

pisoteo del ganado aumento la densidad aparente del suelo y disminuyó la porosidad. No obstante, los macroinvertebrados edáficos pudieron ser favorecidos por las excreciones del ganado vacuno, contrarrestando así el efecto negativo que pudo tener el incremento de D_a y disminución de P_t .

Por otro lado, también se registró una relación negativa entre la diversidad de familias de la macrofauna edáfica y P_{micro} , en el tratamiento BRF. Un hecho contradictorio a lo esperado, pues P_{micro} , estaría asociada con la retención de agua en el suelo, lo que beneficiaría a los macroinvertebrados. Sin embargo, este resultado se puede deber al efecto adicional de tener en este tratamiento (BRF) la mayor biomasa aérea y subterránea del ensayo (Hernández et al., 2011; Ramírez, 2015), con un sistema radicular denso que, junto a una alta retención de agua, pudieron dificultar, bajo ciertas condiciones de anegación, el intercambio gaseoso.

Hasta ahora se ha analizado la relación entre los valores medios de densidad, riqueza y diversidad de familias de los macroinvertebrados edáficos y las propiedades físico-químicas del suelo. No obstante, para analizar la relación entre la densidad de las familias de estos invertebrados y las propiedades físico-químicas del suelo, se realizó un RDA (figura 35 y 36). El cual, en sus tres primeros ejes, explica un 76% de la varianza total. Su primer eje fue determinado principalmente por Termitidae y Tenebrionidae, y en sentido opuesto por Glossoscolecidae, Hymenoptera (NI), Aphodiidae y Blattellidae. El segundo eje fue definido por Elateridae, Miridae y en sentido opuesto por Carabidae y Cryptopidae.



El círculo de correlación mínima, mostrado en la figura 35 y figura 36, revela las propiedades edáficas que mostraron correlación significativa (tabla 21). Según esto, se puede apreciar que en el eje 1 y 2 se configuran gradientes físico-químicos, por un lado, hacia la parte positiva del eje 1, de CE, pH y Da y, en sentido opuesto, de MOS, H y Pt. Por otro lado, hacia la parte positiva del eje 2, de P_{macro} y, al contrario, por P_{micro} .

Tabla 21. Correlación (r) de las propiedades físico-químicas del suelo con los ejes del RDA, formado a través de la densidad de las familias de los macroinvertebrados edáficos de un agroecosistema de sabana con cultivo de maíz asociado con coberturas vegetales con diferentes tratamientos de fertilización, en la Estación Experimental La Iguana. Valores en rojo indican correlación significativa ($p < 0,05$) para un $n = 48$.

Parámetro	Valor r_s		
	Eje 1	Eje 2	Eje 3
Densidad aparente (Da)	0.61	0.06	-0.18
Porosidad total (Pt)	-0.30	-0.18	0.31
Macro Porosidad (P_{macro})	-0.25	0.27	-0.28
Micro Porosidad (P_{micro})	0.04	-0.39	0.38
Conductividad hidráulica (Ksat)	0.10	0.14	0.14
Humedad (H)	-0.55	-0.36	-0.14
Materia orgánica de suelo (MOS)	-0.64	-0.21	-0.40
pH	0.53	-0.26	0.02
Conductividad Eléctrica (CE)	0.76	0.35	-0.38
Fósforo disponible (P)	-0.04	-0.22	0.11

Por otro lado, se puede apreciar en la figura 35, que el ordenamiento de los sitios de muestreo (coberturas vegetales con sus tratamientos y los tiempos de muestreo) estuvo orientado más por el tiempo y por cobertura vegetal, que por el tratamiento de fertilización. Por ejemplo, se puede ver de manera clara

que los puntos correspondientes a los tratamientos del tiempo T6 (sequía), están dispuestos hacia el lado positivo del eje 1 y 2, caracterizados por tener dominancia de Termitidae y Tenebrionidae y valores relativamente altos de CE, Da y el pH. En esa dirección, pero más hacia el centro del RDA, se agrupan los tratamientos de T5 (sequía). Siguiendo el eje 1, hacia el lado positivo del eje 2, se ordenaron los sitios correspondientes a T2 (sequía), caracterizados por una mayor dominancia de Elateridae, Miridae y con una mayor P_{macro} , y del lado negativo del eje 2, un agrupamiento de sitios correspondientes a T1 (período lluvioso), que estuvieron definidos por una dominancia de Carabidae, Cryptopidae y Blatteridae, y por mayores valores de P_{micro} , Pt, H y MOS.

En la figura 35, también se puede apreciar que en el extremo opuesto a los sitios de T6, se disponen los correspondientes a T3 (inicio de lluvias), definidos por Glossoscolecidae, Aphodiidae, Carabidae, Hymenoptera (NI) y valores relativamente altos de MOS, H y Pt, pero también con valores bajos de CE y pH.

Las coberturas vegetales tuvieron un ordenamiento menos evidente, se puede ver, por ejemplo, que Bd de T4 (período de lluvia) se agrupó hacia el lado negativo del eje 2, caracterizados por una mayor dominancia de Carabidae y valores más altos de P_{micro} . Dentro de los sitios T6, los que correspondieron a la cobertura vegetal Cm, fueron más homogéneos (cercaños entre sí), que los de Bd, lo mismo para Cm en los tiempos de muestreo T2 y T5. Mientras que en T1, Bd presentó mayor homogeneidad.

En la dimensión formada por el eje 2 y 3, del mismo RDA (figura 36), el cual suma un 24% de la varianza total, también se muestra un agrupamiento de sitios que depende principalmente del tiempo de muestreo, aunque con menor definición que la dimensión mostrada en la figura 35.

El eje 3, en la figura 36, estuvo determinado principalmente por las familias Tenthredinidae y Tenebrionidae (relacionados positivamente con Pt y P_{micro}) y asociado con los tratamientos de fertilización correspondientes a T1 y T5. En el sentido opuesto del eje 3, se puede apreciar que éste fue determinado por los macroinvertebrados edáficos Formicidae, Glossoscolecidae y Staphylinidae, (relacionados positivamente con CE, P_{macro}), definiendo, principalmente, a los sitios de T6 junto a Termitidae que, en esta dimensión, también estuvo determinando el eje 2. Esto se corresponde con lo reportado en varios trabajos previos (Kooyman y Onck, 1987; Lavelle et al., 2003; Moura et al., 2015; Sanabria et al., 2014), en los cuales se encuentra que las actividades de su traslado, así como de remoción y transporte de material entre los perfiles del suelo, estas familias incrementan la macroporosidad edáfica.

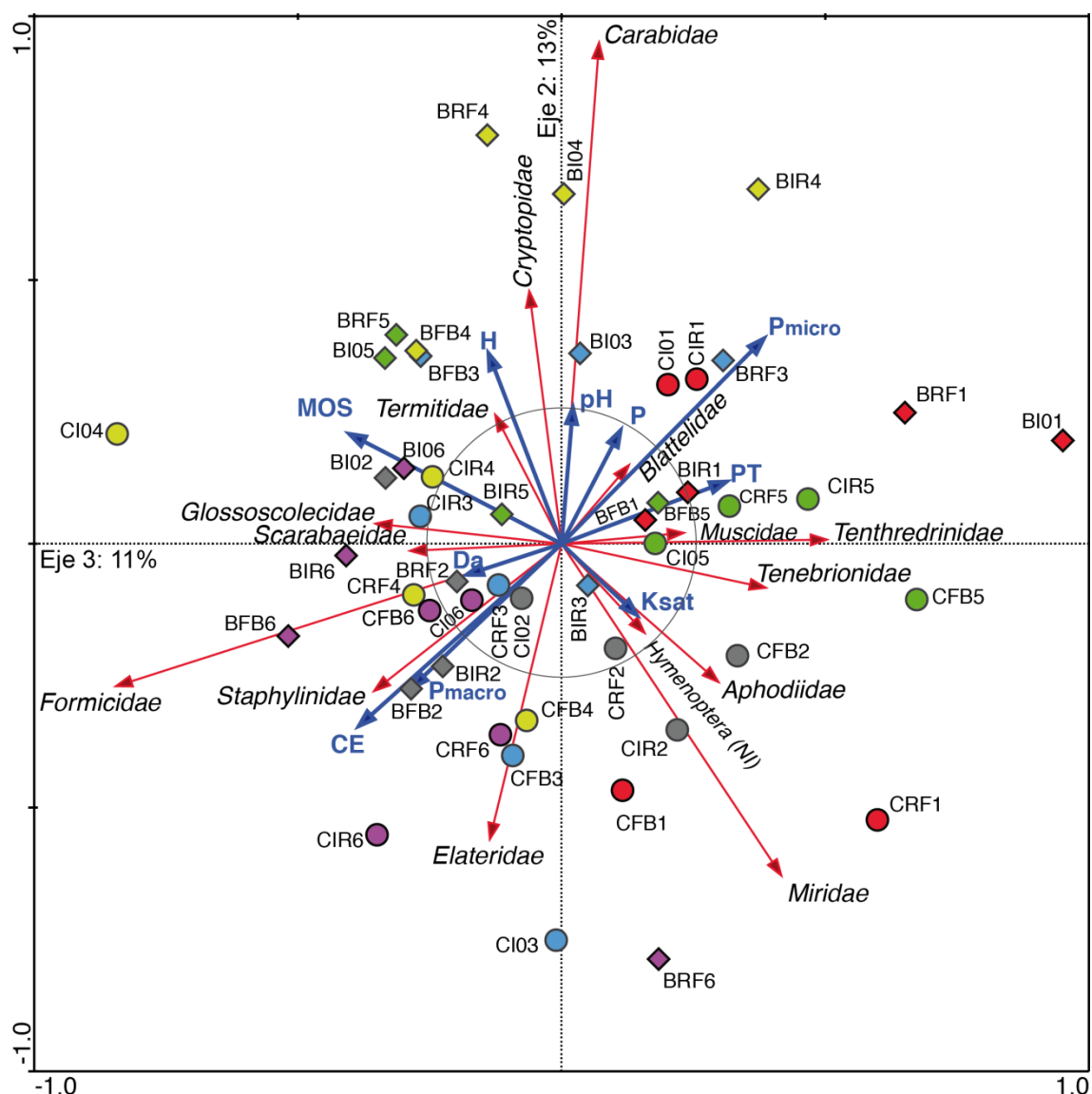


Figura 36. Ordenamiento de los sitios (sabana natural (SN) y cultivo con *Brachiaria dictyoneura* (B) y *Centrosema macrocarpum* (C), con sus tratamientos de fertilización: RF: roca fosfórica; FB: fertilización biológica; IR: fósforo diamónico+roca fosfórica; I0: control. Tiempo de muestreo en número y en color), según la densidad de familias de la macrofauna (vector rojo) y su correlación con las propiedades del suelo (vector azul), a través de un RDA (Ejes 2 y 3). Círculo central: valor mínimo de correlación ($r_s = 0,38$). Se consideraron familias con densidad mayor a $1,5 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$. Nl: No identificada. MOS: materia orgánica del suelo; CE: conductividad eléctrica; P: fósforo disponible; P_{macro} : macroporosidad; P_{micro} : microporosidad; Pt: porosidad total; Da: densidad aparente; H: humedad; Ksat: conductividad hidráulica.

La relación positiva entre Termitidae, Formicidae, Glossoscolecidae, Staphylinidae y Tenebrionidae con CE, se corresponde, por un lado, con lo reportado por trabajos citados anteriormente, donde se registra una relación positiva entre esta propiedad está y los macroinvertebrados; mientras que la relación positiva entre Termitidae y Tenebrionidae con Da, puede explicarse por el hecho de la presencia del ganado, que aunque aumenta la Da, se contrarresta por la incorporación de nutrientes al suelo, a través de su estiércol y orina.

Las familias pertenecientes al orden Coleoptera (Aphodiidae, Staphylinidae, Elateridae, Miridae, Carabidae, Tenebrionidae y Cryptopidae), Formicidae, Glossoscolecidae, se relacionaron positivamente con las propiedades físicas del suelo, relacionadas con la porosidad, tal como lo encontraron en su trabajo Vasconcellos et al. (2013) y explicado tanto por la actividad de esta macrofauna como por el beneficio recíproco que da, el hecho que, con una mayor porosidad, mayor intercambio de gases e infiltración de agua con nutrientes diluidos en ésta. Por otro lado, las familias Blatteridae, Carabidae, Cryptopidae, Glossoscolecidae, Aphodiidae, Hymenoptera (NI) y Termitidae, también se relacionaron con MOS y H, lo que se corresponde con los resultados de varios trabajos, dentro de los cuales, se citan a Bedano et al. (2016), Ernst y Emmerling (2009), Thomas (1998), Wu et al. (2015) y Zhu y Zhu (2015).

4.4. Los macroinvertebrados edáficos como potenciales indicadores de la calidad del suelo

Se determinaron algunas familias de macroinvertebrados edáficos que estuvieron presentes en todas las coberturas vegetales y los tratamientos de fertilización, y otras que estuvieron ausentes en algunos (tabla 22). Dependiendo de su presencia en coberturas o tratamientos, se clasificaron en grupos que pudieron indicar alguna especificidad. Por ejemplo, se registró un grupo de macroinvertebrados que estuvieron presentes en todas las coberturas vegetales, y dentro de estos, un grupo registrados en todos los tratamientos de Bd o en Cm (color beige). Así mismo, se encontraron familias comunes en SN y Cm (color azul), en coberturas vegetales introducidas (rosa) y otras exclusivas a SN (verde), Cm (violeta) y Bd (amarillo).

De los grupos de familias de la macrofauna edáfica, mostrados en la tabla 22, que estuvieron presentes solo en algunas coberturas vegetales, se seleccionaron los indicadores potenciales. Así tenemos que, las familias del orden Coleoptera: Dynastidae y Lampyridae, presentes solo en SN, suponen muy poca tolerancia a la perturbación edáfica y su presencia, indicaría suelos no intervenidos o con muy poca intervención.

Tabla 22. Densidad por familias de la macrofauna edáfica en sabana natural (SN) y cultivo de maíz con *B. dictyoneura* (Bd) y *C. macrocarpum* (Cm) y sus tratamientos: roca fosfórica (RF); fertilización biológica (FB); fósforo diamónico+roca fosfórica (IR) y control (I0). Color indica grupo de familia por cobertura y/o tratamiento de fertilización.

Orden	Familia	Sitios de muestreo										
		Coberturas vegetales			Tratamientos de fertilización							
		SN	Bd	Cm	BRF	BFB	BIR	BI0	CRF	CFB	CIR	CI0
ind·m ⁻²												
Isoptera	Termitidae	30,5	145,9	125,8	127,1	180,4	114,7	161,5	155,6	88,9	166,2	92,6
Hymenoptera	Formicidae	57,7	33,5	45,4	23,1	26,7	60,4	23,8	24,9	75,6	52,4	28,8
Haplotaenidae	Glossoscolecidae	19,8	8,1	10,2	5,3	5,3	2,7	19,2	1,8	8	13,3	17,5
Coleoptera	Carabidae	18,5	10,6	6,2	11,6	8,9	1,8	20,2	1,8	1,8	10,7	10,7
Coleoptera	Scarabaeidae	13,7	13,6	4,1	23,1	11,6	14,2	5,3	8	3,6	0,9	3,8
Coleoptera	Staphylinidae	12,2	6,6	4,5	8	4,4	5,3	8,6	0,9	6,2	3,6	7,4
Coleoptera	Tenebrionidae	5,1	6,3	4,2	8	4,4	10,7	2,3	5,3	4,4	3,6	3,4
Coleoptera	Elateridae	3,6	3,1	5,5	0,9	4,4	5,3	1,9	6,2	3,6	10,7	1,5
Chilopoda	Cryptopidae	1,5	2,2	2,2	5,3	1,8	0,9	0,8	3,6	1,8	1,8	1,5
Heteroptera	Miridae	3,6	1,3	2,6	1,8	0,9	1,8	1		4,4	1,8	4
Araneae	Paratropididae	4,2	1,5	1,1	1,8	1,8	0,9	1,5	1,8			2,5
Coleoptera	Chrysomelidae	3,4	0,9	1,3	0,9	0,9	1,8	0,2		3,6		1,7
Heteroptera	Lygaeidae	1,5	2,1	0,4	2,7	1,8	0,9	3			1,8	
Hymenoptera	Larva (NI)	1,5	2,4	2,5	4,4	4,4		0,8	0,9	1,8	2,7	4,6
Coleoptera	Aphodiidae	5,5	3,4	7	7,1	1,8		4,6	1,8	7,1	7,1	11,8
Coleoptera	Hydroscaphidae	2,1	0,7	1,3			0,9	1,7	1,8	1,8	0,9	0,8
Hymenoptera	Tenthredinidae	7,2	1,6	3,8	3,6	1,8		1		1,8	1,8	11,8
Diptera	Sciaridae	0,8	1,3	1	3,6	0,9		0,8		1,8		2,3
Diptera	Muscidae	6,9	2,8	1,7	3,6		4,4	3	1,8		1,8	3,2
Coleoptera	Rutelidae	4	1,1	0,5	0,9		0,9	2,7				1,9
Diptera	Larva (NI)	1,5	1,2	0,8		1,8		3			0,9	2,3
Solifugae	Ammotrechidae	2,1	0,9	0,4		0,9	0,9	1,7	0,9	0,9		
Homoptera	Cercopidae	1,1	1,9	0,9		0,9	3,6	3,2	0,9	1,8		0,8
Araneae	Dipluridae	2,3	0,6	0,2		1,8		0,8		0,9		
Coleoptera	Coccinellidae	2,3	0,2	0,4		0,9				0,9	0,9	
Lepidoptera	Pieridae	0,8	0,2	0,4		0,9				0,9	0,9	
Diptera	Cecidyomidae	0,8		0,4						0,9	0,9	
Coleoptera	Cerambycidae	1,7		0,2								1
Coleoptera	Geotrupidae	1		0,3								1,1
Blattodea	Blattellidae		1,3	1,9	2,7	1,8		0,8	1,8	0,9	3,6	1,5
Heteroptera	Reduviidae		0,4	0,2			1,8			0,9		
Araneae	Salticidae		0,2	0,4			0,9			1,8		
Diplopoda	Polydesmidae		0,2	0,2		0,9				0,9		
Diptera	Tipulidae		0,2	0,2		0,9					0,9	
Coleoptera	Dynastidae	1,5										
Coleoptera	Lampyridae	2,9										
Lepidoptera	Riodinidae			0,4					0,9	0,9		
Coleoptera	Catopidae			0,2							0,9	
Chilopoda	Scolopendridae			0,2								0,8
Psocoptera	Psocidae		1,5		4,4	0,9		0,8				
Coleoptera	Cicindelidae		0,2				0,9					
Coleoptera	Curculionidae		0,2					0,8				
Isoptera	Pentatomidae		0,2					0,8				
Orthoptera	Gryllotalpidae		0,2					0,8				
Densidad		221,3	258,9	239,3	249,8	273,8	235,6	276,6	220,4	227,6	289,8	219,2
Familias												
Riqueza		31	36	37	21	27	21	30	18	27	23	25
Diversidad		14,6	6,6	6,4	7,2	4,7	5,4	5,8	3,5	6,7	5,0	9,0
Índice Sorensen		1	0,78	0,85	0,73	0,79	0,69	0,79	0,65	0,76	0,74	0,82
Lombrices:termitas		0,65	0,06	0,08	0,04	0,03	0,02	0,12	0,01	0,09	0,08	0,19

La familia Lampyridae, efectivamente, se ha reportado como un potencial indicador de ambientes no intervenidos o poco intervenidos (Viviani y Santos, 2012). Sin embargo, Dynastidae, según Otavo et al. (2013), presenta géneros y especies que pueden estar presentes en ambientes intervenidos o sin intervención, por lo que se requieren de estudios más específicos sobre el o los géneros presentes en dicho ambiente, antes de inferir sobre su utilidad y sensibilidad como indicador biológico.

Por otro lado, en la tabla 22, se evidencia que Blattellidae, Reduviidae, Salticidae, Polydesmidae y Tipulidae, mostraron ser familias que, al estar sólo en suelos intervenidos, son potenciales indicadores de un grado de intervención. Esto se corresponde con el trabajo de Vasconcellos et al. (2013), quienes, para el caso de Blattellidae, solo lo encontraron en ambientes intervenidos. Así mismo, para Reduviidae (Román-Garrido et al., 2016), Polydesmidae (Liu, 2013; Unigarro et al., 2012), que se reportan como familias que se desarrollan en ambientes intervenidos. Por el contrario, la familia Salticidae, tiene géneros y especies que se han reportado también en ambientes sin o con poca intervención (Neet, 1996), lo mismo para Tipulidae (Frouz, 1998), por lo que se requeriría de más investigación sobre las especies o géneros presentes en estos ambientes, para poder inferir sobre su potencialidad como indicadores del estado en estos ambientes.

Además, en la tabla 22, se puede ver que Termitidae fue beneficiada por la intervención, aumentando su media de densidad en las coberturas vegetales introducidas, respecto a SN ($p < 0,05$). Contrariamente, a Glossoscoleidae, que

disminuyó significativamente su densidad en estas coberturas en relación a NS, pudiendo ser indicadora potencial de perturbación. Esto es un hecho ya argumentado y referido en secciones anteriores, por lo que este resultado podría considerarse como una confirmación de reportes previos.

Al revisar los valores totales de densidad por cobertura vegetal y tratamiento de fertilización, en la tabla 22, se puede ver que no existen diferencias significativas entre estos, lo que sugiere, como ya se refirió anteriormente, que este atributo ecológico, no es un buen indicador del estado del suelo. Sin embargo, cuando se comparó la riqueza y el índice de diversidad de familias total por cobertura vegetal y tratamiento, se puede apreciar que existen diferencias importantes, por ejemplo, la riqueza registrada en SN y el cultivo de maíz con las coberturas asociadas, desde los 76 días de iniciado el estudio hasta su término, fue de 31, 36 y 37 familias, respectivamente. Este resultado indicaría que la comunidad de macroinvertebrados edáficos fue favorecida por la actividad agrícola, lo que se corresponde con varios autores (Bedano et al., 2016; Decaëns et al., 2003b). Además, la sustitución de familias de SN en las coberturas vegetales introducidas fue baja, pues solo son dos las familias exclusivas a SN.

No obstante, cuando se compara la diversidad total por cobertura, se puede apreciar que SN registra un valor de diversidad (14,6 familias) de más del doble que el de las coberturas vegetales asociadas al cultivo de maíz (Bd: 6,6 y Cm: 6,4 familias). En ese caso, la diversidad, brindó información más relevante que la riqueza de familias, aunque en este caso, solo se podría inferir

acerca del grado de perturbación, sin poder comparar entre las comunidades de macroinvertebrados edáficos presentes en los cultivos asociados a las coberturas vegetales introducidas.

En este sentido, el índice de similaridad de Sørence, puede dar mayor información sobre el grado de afectación de las comunidades de macroinvertebrados edáficos por la actividad agrícola. De acuerdo a éste, la comunidad más similar a SN, en cuanto a composición de familias y que, por tal, pudo tuvo un menor impacto, fue la presente en Cm. Así mismo, la relación lombrices de tierra:termitas, sugiere, hasta cierto punto, que fue el manejo agrícola con esta cobertura vegetal, la que generó menos impacto negativo sobre el suelo. Este hecho se explica, teniendo en cuenta que la asociación del cultivo con leguminosas, como fijadoras de nitrógeno atmosférico, aumenta la calidad del material vegetal incorporado al suelo, incrementando la actividad biológica y los procesos físico-químicos ligados a ésta (Decaëns et al., 2003b; Vitousek et al., 2010).

Sin embargo, lo anterior es considerando la suma de todas las familias presentes en los tratamientos de cada cobertura, pero al evaluar por tratamiento, se puede ver que la suma de las familias por cada uno, es inferior que SN, solo se le acerca el tratamiento BI0, con 30 familias, con un índice de similaridad de Sørensen de 0,79; seguido de BFB, CFB y CI0, con 27, 27 y 25 familias, respectivamente y, en ese mismo orden, los valores del índice de Sørensen fueron: 0,79; 0,76 y 0,82, siendo el más similar CI0. En este tratamiento control, se registra el valor de diversidad más cercano a SN, con

9,02 y también la relación lombrices de tierra:termitas más alta (0,19), seguido de BI0 (0,12). Este resultado indica que, en este manejo agrícola, los tratamientos sin fertilización de ambas coberturas, fueron los que menos afectaron la comunidad de macroinvertebrados edáficos y que, de estos dos, fue CI0 la que menor impacto generó.

Al correr el RDA con los datos de la tabla 22 (figura 37 y figura 38), explicando un 66% de varianza total en los tres primeros ejes, se puede apreciar, en la figura 37, que el primer eje, está determinado principalmente por las familias Cerambycidae, Staphylinidae, Geotrupidae, Rutelidae, Lampyridae, Dynastidae y Glossoscolecidae, y en sentido contrario por Termitidae. Por otro lado, el eje 2, fue determinado principalmente por Reduviidae, Salticidae y Formicidae, y en sentido opuesto por Blattellidae y la larva no identificada de Hymenoptera.

En la figura 37 se puede apreciar que, a lo largo del eje 1, se agrupan hacia el lado positivo, los sitios con menor intervención (sin fertilización: CI0 y BI0) o sin ésta (SN). CI0 y BI0, determinados principalmente por Aphodidae, Carabidae, y larva de Diptera; y SN por Lampyridae, Dynastidae. Mientras tanto, del lado opuesto del eje 1 todos los sitios con fertilización. De estos últimos, CRF, CIR, BFB y BRF, determinados principalmente por Termitidae, Blattellidae y larva de Hymenoptera, mientras que BIR y CFB, fueron determinados por Reduviidae, Salticidae y Formicidae.

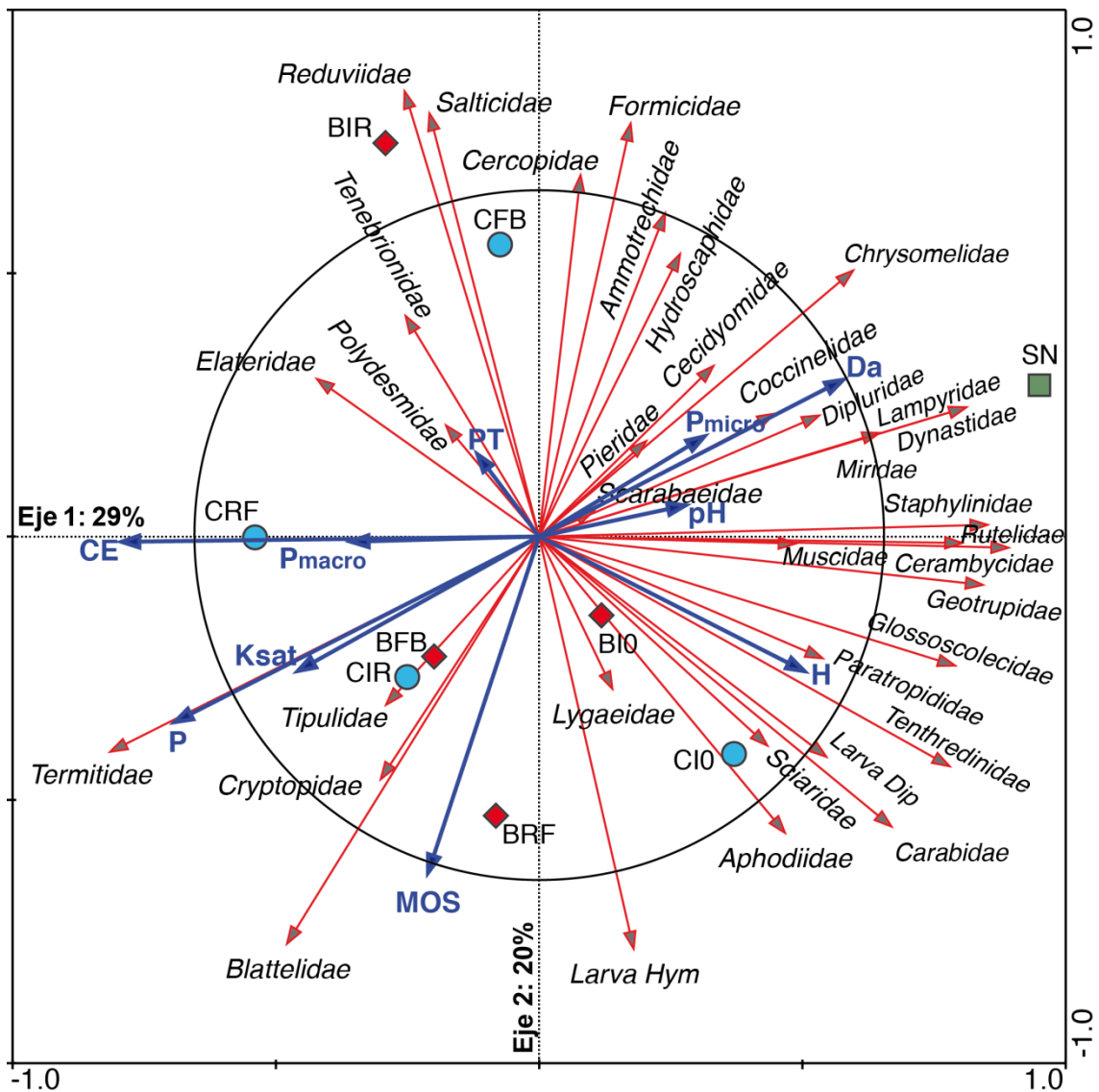


Figura 37. Ordenamiento de los sitios (sabana natural (SN) y cultivo con *Brachiaria dictyoneura* (B) y *Centrosema macrocarpum* (C), con sus tratamientos de fertilización: RF: roca fosfórica; FB: fertilización biológica; IR: fósforo diamónico+roca fosfórica; I0: control), según la densidad de familias de la macrofauna (cursiva) y su correlación con las propiedades del suelo (letras y vector azul), a través de un RDA (Ejes 1 y 2). Círculo central: valor mínimo de correlación ($r_s = 0,64$). Se consideraron familias con densidad mayor a $0,9 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$. Larva Hym (larva de Hymenoptera); Larva Dip (larva de Diptera). MOS: materia orgánica del suelo; CE: conductividad eléctrica; P: fósforo disponible; P_{macro} : macroporosidad; P_{micro} : microporosidad; Pt: porosidad total; Da: densidad aparente; H: humedad; Ksat: conductividad hidráulica.

De acuerdo al círculo de correlación, mostrado en la figura 37, que marca el valor mínimo de correlación de Spearman, se puede apreciar que las propiedades edáficas que se correlacionaron significativamente con los ejes 1 y 2, fueron CE, P y MOS (tabla 23).

Tabla 23. Correlación (r) de las propiedades físico-químicas del suelo con los ejes del RDA, formado a través de la densidad de las familias de los macroinvertebrados edáficos de un agroecosistema de sabana con cultivo de maíz asociado con coberturas vegetales con diferentes tratamientos de fertilización, en la Estación Experimental La Iguana. Valores en rojo indican correlación significativa ($p < 0,05$) para un $n = 9$.

Parámetro	Valor r_s		
	Eje 1	Eje 2	Eje 3
Densidad aparente (Da)	0.60	0.30	0.23
Porosidad total (Pt)	-0.12	0.16	-0.24
Macro Porosidad (P_{macro})	-0.36	-0.01	0.19
Micro Porosidad (P_{micro})	0.32	0.19	-0.42
Conductividad hidráulica (Ksat)	-0.46	-0.26	-0.45
Humedad (H)	0.50	-0.26	-0.01
Materia orgánica de suelo (MOS)	-0.21	-0.64	-0.14
pH	0.28	0.06	-0.47
Conductividad Eléctrica (CE)	-0.80	-0.01	-0.16
Fósforo disponible (P)	-0.69	-0.35	0.01

De acuerdo a los valores en la tabla 23 y a la aproximación entre vectores de las propiedades físico-químicas del suelo y las familias de los macroinvertebrados del suelo, se tiene que Termitidae y Blattellidae, estarían asociados con altos valores de CE, P y MOS. Mientras que Lampyridae, Dynatidae, Staphylinidae, Rutelidae, Cerambycidae y Geotrupidae, tuvieron una relación negativa con CE y P. Esto se pudo corroborar en la dimensión 1 y 3 del RDA (figura 38), donde, además, se aprecia que Termitidae, guarda relación con CE y P.

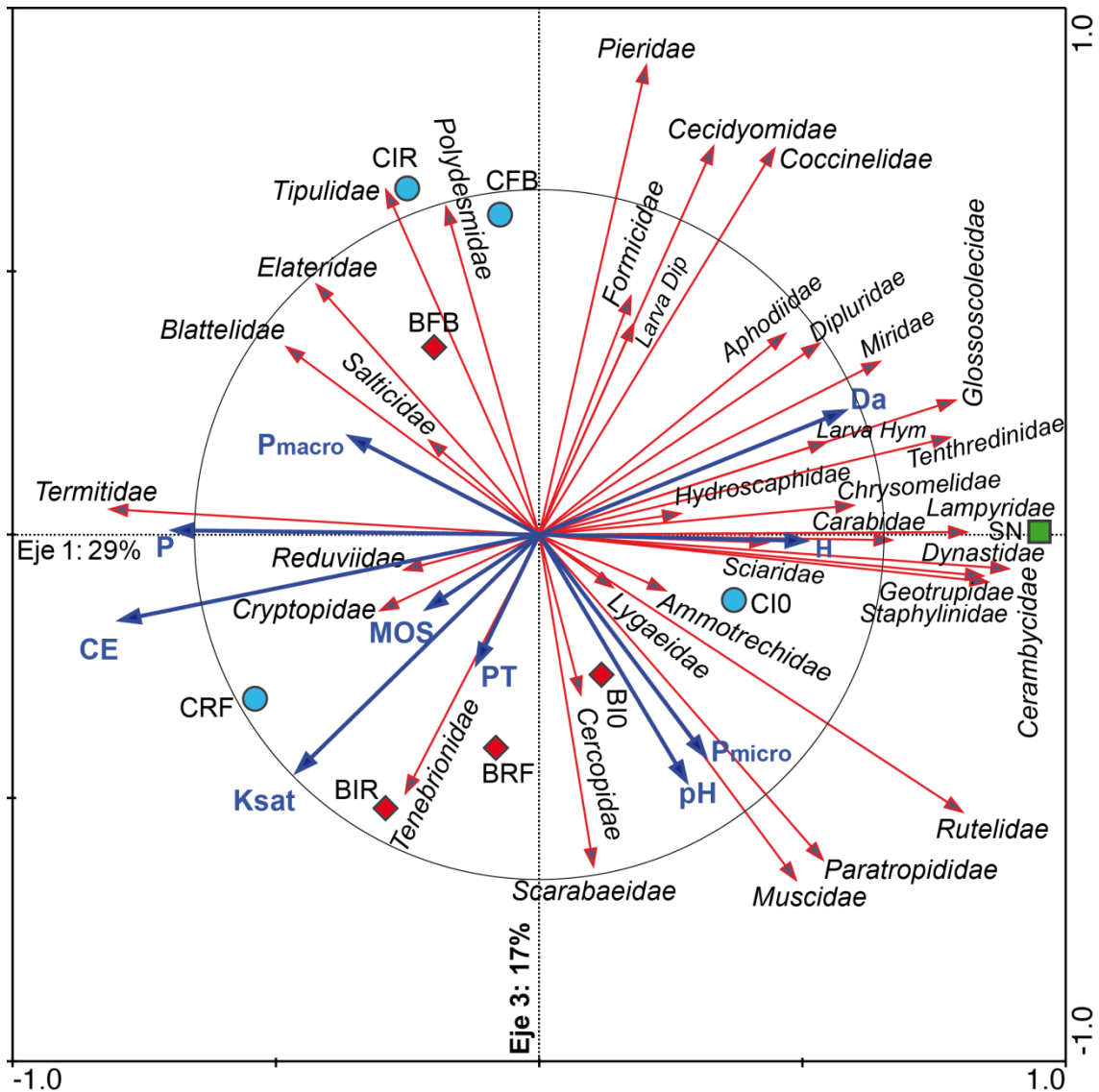


Figura 38. Ordenamiento de los sitios (sabana natural (SN) y cultivo con *Brachiaria dictyoneura* (B) y *Centrosema macrocarpum* (C), con sus tratamientos de fertilización: RF: roca fosfórica; FB: fertilización biológica; IR: fósforo diamónico+roca fosfórica; I0: control), según la densidad de familias de la macrofauna (cursiva) y su correlación con las propiedades del suelo (letras y vector azul), a través de un RDA (Ejes 1 y 3). Círculo central: valor mínimo de correlación ($r_s = 0,64$). Se consideraron familias con densidad mayor a $0,9 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$. Larva Hym (larva de Hymenoptera); Larva Dip (larva de Diptera). MOS: materia orgánica del suelo; CE: conductividad eléctrica; P: fósforo disponible; P_{macro}: macroporosidad; P_{micro}: microporosidad; Pt: porosidad total; Da: densidad aparente; H: humedad; Ksat: conductividad hidráulica.

Como ya se refirió en una sección anterior, la fertilización en el cultivo asociado con las coberturas vegetales, incrementó los valores de P, y favoreció la productividad vegetal, lo que, en consecuencia, incrementó los valores de MOS. Esto se vio reflejado en las figuras 37 y 38, pues los vectores de estas propiedades edáficas se direccionaron hacia los sitios intervenidos.

Por otro lado, en las figuras 37 y 38, se pudo apreciar que los vectores de Termitidae y Glossoscolecidae están en contrasentido, y de acuerdo a la literatura citada (Barros et al., 2002; Decaëns et al., 2003b; Lavelle et al., 1993), Termitidae estuvo asociada o favorecida por sitios intervenidos, mientras que Glossoscolecidae, se vio sensiblemente afectada por la intervención.

Llama la atención que, tomando como referencia SN, fueron los tratamientos control, de ambas coberturas vegetales, los que generaron menor impacto a la comunidad de macroinvertebrados edáficos. De éstas, CI0, de acuerdo al índice de diversidad y a la relación lombrices de tierra:termitas, supondría menor impacto. Como se explicó anteriormente, esto se debe a una mejor calidad del material vegetal incorporado al suelo.

Con estos resultados se comprueba la potencialidad y la factibilidad del uso de los macroinvertebrados edáficos como indicadores de la calidad del suelo.

Sin embargo, se corrobora lo referido por varios autores (Jiménez y González-Quñones, 2006; Pulleman et al., 2012), respecto a la necesidad de

tener indicadores de calidad del suelo complementarios; ya que, si bien con este trabajo se evidenció la potencialidad del uso de la macrofauna edáfica como indicador, se puede apreciar en la figura 39, que los cultivos sin fertilización tuvieron muy baja productividad respecto a los que se desarrollaron con fertilización; lo que para un agroecosistema sería crítico. Este hecho se reseña en publicaciones previas sobre este mismo ensayo agroecológico (Castro, 2016; Hernández et al., 2011; Ramírez, 2015).

Por otro lado, analizando la figura 39, que en cierto modo representa un esquema general integrador de los resultados obtenidos, se puede sugerir que, en general el manejo conservacionista del suelo, en el que se dejó residuos vegetales sobre éste, surtió un efecto protector sobre la macrofauna edáfica en el período seco, ante los factores limitantes como la humedad mínima y la temperatura edáfica; lo que aunado a la deposición de estiércol por parte del ganado, como aporte de nutrientes al suelo, generaron las condiciones para que, en el cultivo con asociación a coberturas vegetales y tratamientos de fertilización, hubiese una mayor densidad media de macroinvertebrados edáficos que en el resto de períodos meteorológicos.

Además, en la figura 39, se puede ver que la mayoría de vectores de familias de la macrofauna edáfica van en dirección de SN y tratamientos sin fertilización de Cm y Bd (CI0 y BI0) y, por otra parte, que los mayores valores de diversidad se registraron en SN y Cm. Esto sugiere que el manejo de cultivo de maíz con cobertura *C. macrocarpum*, tendría la potencialidad de ser sustentable en el tiempo.

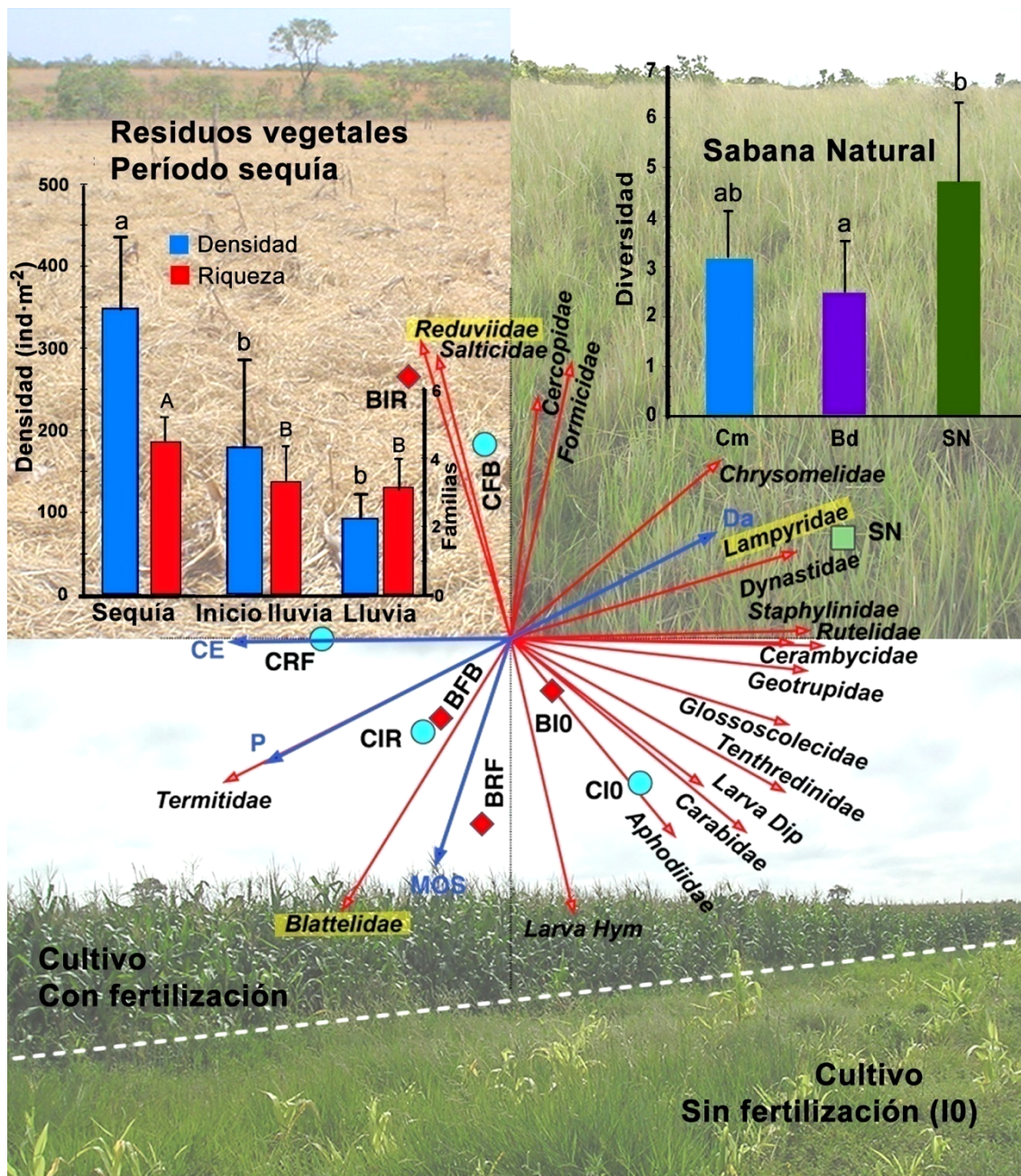


Figura 39. Esquema resumen del estudio de los macroinvertebrados edáficos en un manejo agroecológico en una sabana bien drenada de los llanos venezolanos. Se subraya en amarillo familias potenciales indicadoras de calidad edáfica. En gráficos letras diferentes indican diferencias significativas.

5. Conclusiones

1. Se caracterizó la comunidad de macroinvertebrados edáficos de una sabana bien drenada de los llanos venezolanos. Los resultados revelaron que la macrofauna del suelo natural tuvo una densidad promedio de $243,5 \pm 183,6 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$, distribuidos en 32 familias y 11 órdenes, con una diversidad media, en la serie Hill, de $N_1 = 4,5 \pm 2,8$ familias. Coleoptera fue el orden más dominante, seguido de Hymenoptera e Isoptera, mientras que el menos dominante fue Lepidoptera. Dentro de las familias, el orden de dominancia fue: Formicidae, Termitidae y Glossoscolecidae.
2. La comunidad de macroinvertebrados del suelo tuvo una baja densidad comparada con la de otros ambientes; no obstante, mostró una mayor riqueza de familias, permitiendo inferir que las condiciones edafoclimáticas del área de estudio podrían ser desfavorables para poblaciones grandes; lo que, por otro lado, probablemente aumentó la riqueza de las familias. Esto podría ser beneficioso para el agro-ecosistema, en un manejo conservacionista, ya que su diversidad de especies y sus complejas relaciones, lo harían menos susceptible a potenciales plagas.
3. Se registró una disminución de los atributos ecológicos de la macrofauna edáfica con el tiempo. Este hecho pudo asociarse a cambios en algunas propiedades del suelo, particularmente las propiedades físicas, determinantes de la humedad del suelo y el intercambio de gases. Se evidenció además que la comunidad de macroinvertebrados edáficos,

tanto de la sabana natural como de la cultivada, tuvo una estrecha relación con la densidad aparente y porosidad del suelo, por lo que, aunque este suelo es franco-arenoso, debe ser una condición importante a tener en cuenta en las actividades agrícolas.

4. En general, el manejo agroecológico no generó un impacto negativo significativo sobre la macrofauna edáfica, pero tampoco la favoreció. Sin embargo, algunos grupos como Termitidae, fueron beneficiados por el manejo agrícola, aunque en detrimento de la equidad de la comunidad. Este hecho fue más importante en el cultivo de maíz asociado con la gramínea *Brachiaria dictyoneura*, que con la leguminosa *Centrosema macrocarpum*, independientemente de los tratamientos de fertilización.
5. Se evidenció que las coberturas vegetales y los tratamientos de fertilización no se diferenciaron al considerar la media de densidad, riqueza y diversidad de familias de la macrofauna edáfica, y sí cuando se analizó, considerando la variación temporal de estos, por tiempos de muestreos y por período climático. De ello puede concluirse que el efecto de los períodos climáticos fue más importante que el del manejo agrícola.
6. Se determinaron relaciones entre la media de los atributos ecológicos de las comunidades de los macroinvertebrados edáficos presentes en el agroecosistema y varias propiedades edáficas; así mismo se detectaron entre algunas propiedades del suelo y familias de estas comunidades; lo que permitió explicar algunas de sus variaciones registradas. Las

propiedades edáficas más importantes, en cuanto a frecuencia de relaciones significativas, fueron la conductividad eléctrica, porosidad, densidad aparente y fósforo disponible.

7. Se infiere que el manejo agrícola generó cambios en las relaciones de los distintos compartimientos edáficos; por un lado, las relaciones entre la macrofauna edáfica y propiedades del suelo se diferenciaron por tratamiento de fertilización en una misma cobertura, y por otro lado, estas relaciones también dependieron de la cobertura vegetal aunque se hubiese aplicado un mismo tratamiento de fertilización.
8. Se comprueba la potencialidad y la factibilidad del uso de los macroinvertebrados edáficos, como indicadores de la calidad del suelo. Por un lado, se pudo determinar que la familia Lampyridae es una familia potencial a usar en este ambiente, como indicador de un suelo no intervenido. Mientras que Blattellidae, Reduviidae y Polydesmidae, pudieran ser indicadoras de suelos intervenidos. Sin embargo, se requieren estudios a niveles taxonómicos más específicos para tener mayor precisión, por otro lado, con el uso de índices basados en la diversidad (serie Hill), composición de familias (Sørensen), y relación lombrices de tierra: termitas, se pudo comprobar la factibilidad de usarlos para determinar los efectos de la intervención sobre el suelo.
9. Con el uso de estos indicadores y en base a la estructura ecológica de la macrofauna edáfica, se pudo inferir que el manejo agrícola que menor

impacto tuvo sobre ésta, fueron los tratamientos sin fertilización, y dentro de estos, el de la cobertura *Centrosema macrocarpum*. No obstante, para direccionar en función de la sustentabilidad del agroecosistema, se sugiere complementar con indicadores que integren su productividad.

6. Bibliografía

- Acevedo, E., Martínez, E., 2003. Sistema de labranza y productividad de los suelos, en: Acevedo, E. (Ed.), *Sustentabilidad en cultivos anuales: cero labranza, manejo de rastrojos*. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago. Chile, pp. 13-25.
- Alcaraz, F.J., 2012. Bosques monzónicos y sabanas (No. 23), *Geobotánica*. Murcia, España.
- Anderson, J.M., 1988. Spatiotemporal effects of invertebrates on soil processes. *Biol. Fertil. Soils* 6, 216-227. doi:10.1007/BF00260818
- Anderson, J.M., Ingram, J.S.I., 1993. *Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Method*, 1.^a ed. CAB International, Oxford. Uk.
- Anderson, J.M.M., Ingram, J.S.I., 1998. *Tropical Soil Biology and Fertility. A Handbook of Methods.*, Second Edi. ed. CAB International, Oxford. Uk.
- Araújo, V.F.P., Bandeira, a G., Vasconcellos, A., 2010. Abundance and stratification of soil macroarthropods in a Caatinga Forest in Northeast Brazil. *Brazilian J. Biol.* 70, 737-46. doi:10.1590/S1519-69842010000400006
- Araujo, Y., López-Hernández, D., 1999. Caracterización de las poblaciones de lombrices de tierra en un sistema de agricultura orgánica ubicado en una sabana en el amazonas venezolano. *Ecotropicos* 12, 49-55.
- Ayuke, F.O., Pulleman, M.M., Vanlauwe, B., de Goede, R.G.M., Six, J., Csuzdi, C., Brussaard, L., 2011. Agricultural management affects earthworm and termite diversity across humid to semi-arid tropical zones. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140, 148-154. doi:10.1016/j.agee.2010.11.021
- Bardgett, R.D., van der Putten, W.H., 2014. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature* 515, 505-511. doi:10.1038/nature13855
- Barros, E., Pashanasi, B., Constantino, R., Lavelle, P., 2002. Effects of land-use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia. *Biol. Fertil. Soils* 35, 338-347. doi:10.1007/s00374-002-0479-z
- Bayer, C., Gomes, J., Zanatta, J.A., Vieira, F.C.B., Dieckow, J., 2016. Mitigating greenhouse gas emissions from a subtropical Ultisol by using long-term no-tillage in combination with legume cover crops. *Soil Tillage Res.* 161, 86-94. doi:10.1016/j.still.2016.03.011
- Bedano, J.C., Domínguez, A., Arolfo, R., Wall, L.G., 2016. Effect of Good Agricultural Practices under no-till on litter and soil invertebrates in areas with different soil types. *Soil Tillage Res.* 158, 100-109. doi:10.1016/j.still.2015.12.005
- Benito, N.P., Brossard, M., Pasini, A., Guimarães, M.D.F., Bobillier, B., 2005. Transformations of soil macroinvertebrate populations after native vegetation conversion to pasture cultivation (Brazilian Cerrado). *Eur. J. Soil Biol.* 40, 147-154. doi:10.1016/j.ejsobi.2005.02.002

- Berg, M.P., Bengtsson, J., 2007. Temporal and spatial variability in soil food web structure. *Oikos* 116, 1789-1804. doi:10.1111/j.2007.0030-1299.15748.x
- Berroterán, J.L., 2000. Modelo de utilización cereal-pasto en sistemas de producción de sabanas bien drenadas con suelos ácidos en Venezuela. *Interciencia* 25, 203-209.
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk Density, en: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1 -Physical and Mineralogical Methods*. ACSESS-Alliance of Crop, Soil, and Environmental Science Societies, Madison, USA., pp. 363-375. doi:10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13
- Bottinelli, N., Henry-des-Tureaux, T., Hallaire, V., Mathieu, J., Benard, Y., Duc Tran, T., Jouquet, P., 2010. Earthworms accelerate soil porosity turnover under watering conditions. *Geoderma* 156, 43-47. doi:10.1016/j.geoderma.2010.01.006
- Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., Peng, X., 2015. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil Tillage Res.* 146, 118-124. doi:10.1016/j.still.2014.01.007
- Brussaard, L., Pulleman, M.M., Ouédraogo, É., Mando, A., Six, J., 2007. Soil fauna and soil function in the fabric of the food web. *Pedobiologia (Jena)*. 50, 447-462. doi:10.1016/j.pedobi.2006.10.007
- Busari, M.A., Kukal, S.S., Kaur, A., Bhatt, R., Dulazi, A.A., 2015. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 3, 119-129. doi:10.1016/j.iswcr.2015.05.002
- Cabrera, G., 2012. La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación/perturbación del suelo. Resultados obtenidos en Cuba. *Pastos y Forrajes* 35, 349-364.
- Cabrera, G., Robaina, N., de León, D.P., 2011. Riqueza y abundancia de la macrofauna edáfica en cuatro usos de la tierra en las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba. *Pastos y Forrajes* 34, 313-330.
- Carpenter, S.R., 1998. The Need for Large-Scale and Experiments of Predict the Response to Perturbation Ecosystems, en: Pace, M.L., Groffman, P.M. (Eds.), *Success, limitations, and frontiers in ecosystem science*. New York. USA, pp. 287-312.
- Castro, I., 2016. Disponibilidad y conservación del N y C en agroecosistemas de sabanas bien drenadas cultivados con maíz. Universidad Central de Venezuela.
- Castro, I., 2006. Informe de pasantía: Modelización de la materia orgánica del suelo en ecosistemas venezolanos. Caracas.
- Cecagno, D., de Andrade Costa, S.E.V.G., Anghinoni, I., Kunrath, T.R., Martins, A.P., Reichert, J.M., Gubiani, P.I., Balerini, F., Fink, J.R., de Faccio Carvalho, P.C., 2016. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil Tillage Res.* 156, 54-62. doi:10.1016/j.still.2015.10.005

- Chacón, P., Lopez-Hernández, I.D., Lamotte, M., 1991. Le cycle de l'azote dans une savane à *Trachypogon* au centre du Venezuela. *Rev. d'écologie Biol. du sol* 28, 67-75.
- Chapin, F.S., Matson, P.A., Vitousek, P.M., 2011. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology, Second ed. ed, A New Synthesis*. Springer New York, New York, NY. doi:10.1007/978-1-4419-9504-9
- Coleman, D.C., Hendrix, P.F., 2000. *Invertebrates as Webmasters in Ecosystems*. CABI Pub, Wallingford.
- Comor, V., Thakur, M.P., Berg, M.P., de Bie, S., Prins, H.H.T., Van Langevelde, F., 2014. Productivity affects the density-body mass relationship of soil fauna communities. *Soil Biol. Biochem.* 72, 308-311. doi:10.1016/j.soilbio.2014.02.003
- Costa, M.M., Queiroz, D.M. de, Pinto, F.D.A. de C., Reis, E.F. dos, Santos, N.T., 2014. Moisture content effect in the relationship between apparent electrical conductivity and soil attributes. *Acta Sci. Agron.* 36, 395. doi:10.4025/actasciagron.v36i4.18342
- Darwin, C., 1881. *The Formation of Vegetable Mould: Through the Action of Worms, with Observations on Their Habits*, 2.^a ed. John Murray, Londres.
- de Aquino, A.M., Ferreira da Silva, R., Mercante, F.M., Fernandes Correia, M.E., de Fátima Guimarães, M., Lavelle, P., 2008. Invertebrate soil macrofauna under different ground cover plants in the no-till system in the Cerrado. *Eur. J. Soil Biol.* 44, 191-197. doi:10.1016/j.ejsobi.2007.05.001
- de Wit, J., Oldenbroek, J.K., van Keulen, H., Zwart, D., 1995. Criteria for sustainable livestock production: a proposal for implementation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 53, 219-229. doi:10.1016/0167-8809(94)00579-4
- Decaëns, T., 2010. Macroecological patterns in soil communities. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 19, 287-302. doi:10.1111/j.1466-8238.2009.00517.x
- Decaëns, T., Galvis, J.H., Amézquita, E., 2003a. Propiedades de las Estructuras Construidas por los Ingenieros del Ecosistema en la Superficie del Suelo de una Sabana Colombiana1 Materiales y Métodos, en: Jiménez, J.J., Thomas, R.J. (Eds.), *El arado natural: Las comunidades de macroinvertebrados del suelo en las sabanas neotropicales de Colombia*. CIAT, Cali. Colombia, pp. 171-197.
- Decaëns, T., Jiménez, J.J., Gioia, C., Measey, G.J., Lavelle, P., 2006. The values of soil animals for conservation biology. *Eur. J. Soil Biol.* 42, S23-S38. doi:10.1016/j.ejsobi.2006.07.001
- Decaëns, T., Lavelle, P., Jiménez, J.J., Escobar, G., Rippstein, G., Schneidmadl, J., Sanz, J., Hoyos, P., Thomas, R., 2003b. Impacto del uso de la tierra en la macrofauna del suelo de los Llanos Orientales de Colombia, en: Jiménez, J., Thomas, R. (Eds.), *El Arado Natural: Las Comunidades de Macroinvertebrados del Suelo en las Sabanas Neotropicales de Colombia*. CIAT, Cali, Colombia, pp. 21-45.
- Decaëns, T., Lavelle, P., Jiménez, J.J., Escobar, G., Rippstein, G., Schneidmadl, J., Sanz, J.I., Hoyos, P., Thomas, R.J., 2001. Impact of land

- management on soil macrofauna in the Eastern savannas of Colombia, en: Rippstein, G., Escobar, G., Motta, F. (Eds.), *Soil Macroinvertebrate Communities in the Neotropical Savannas of Colombia*. CIAT, Cali, pp. 111-137.
- Doamba, S., Savadogo, P., Nacro, H.B., 2014. Effects of burning on soil macrofauna in a savanna-woodland under different experimental fuel load treatments. *Appl. Soil Ecol.* 81, 37-44. doi:10.1016/j.apsoil.2014.04.005
- Domínguez, A., Bedano, J.C., Becker, A.R., 2010. Negative effects of no-till on soil macrofauna and litter decomposition in Argentina as compared with natural grasslands. *Soil Tillage Res.* 110, 51-59. doi:10.1016/j.still.2010.06.008
- Domínguez, A., Bedano, J.C., Becker, A.R., 2009. Cambios en la comunidad de lombrices de tierra (Annelida: Lumbricina) como consecuencia del uso de la técnica de siembra directa en el centro-sur de Córdoba, Argentina. *Cienc. del Suelo* 27, 11-19.
- Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicsek, D.F., Stewart, B.A., Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and Assessing Soil Quality, en: Doran, J.W. (Ed.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, SSSA Special Publication 35. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, USA., p. 244. doi:10.2136/sssaspecpub35.c1
- Eckschmitt, K., Wolters, V., Weber, M., Benckiser, G., 1997. Spiders, carabids and staphylinids: the ecological potential of predatory macroarthropods., en: Benckiser, G. (Ed.), *Fauna in soil ecosystems: recycling processes, nutrient fluxes, and agricultural production*. Marcel Dekker, New York. USA, pp. 307-362.
- Ernst, G., Emmerling, C., 2009. Impact of five different tillage systems on soil organic carbon content and the density, biomass, and community composition of earthworms after a ten year period. *Eur. J. Soil Biol.* 45, 247-251. doi:10.1016/j.ejsobi.2009.02.002
- Ettema, C and Wardle, D., 2002. Spatial soil ecology. *Trends Ecol. Evol.* 17, 177-183. doi:10.1016/S0169-5347(02)02496-5
- FAO, 2012. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo., En Español. ed. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Mundi-Prensa, Madrid. España.
- FAO, 1992. Manual de sistemas de labranza para América Latina, Boletín de suelos de la FAO. Fao Inter-Departmental Working Group, Roma.
- Feller, C., Brown, G.G., Blanchart, E., Deleporte, P., Chernyanskii, S.S., 2003. Charles Darwin, earthworms and the natural sciences: various lessons from past to future. *Agric. Ecosyst. Environ.* 99, 29-49. doi:10.1016/S0167-8809(03)00143-9
- Flohre, A., Fischer, C., Aavik, T., Bengtsson, J., Berendse, F., Bommarco, R., Ceryngier, P., Clement, L.W., Dennis, C., Eggers, S., Emmerson, M., Geiger, F., Guerrero, I., Hawro, V., Inchausti, P., Liira, J., Morales, M.B.,

- Oñate, J.J., Pärt, T., Weisser, W.W., Winqvist, C., Thies, C., Tschardtke, T., 2011. Agricultural intensification and biodiversity partitioning in European landscapes comparing plants, carabids, and birds. *Ecol. Appl.* 21, 1772-1781. doi:10.2307/23023116
- Foghin-Pillin, S., 2002. Tiempo y clima en Venezuela. Aproximación a una geografía climática del territorio venezolano, 1.^a ed. Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Caracas.
- Frouz, J., 1998. Changes of crane-flies (Tipulidae) larvae population during secondary succession., en: Pizl, V., Tajovsky, K. (Eds.), *Soil Zoological Problems in Central Europe*. CEWSZ, UPB AV CR, Ceske Budejovice, Czech Republic, pp. 31-36.
- Geiger, F., Bengtsson, J., Berendse, F., Weisser, W.W., Emmerson, M., Morales, M.B., Ceryngier, P., Liira, J., Tschardtke, T., Winqvist, C., Eggers, S., Bommarco, R., Pärt, T., Bretagnolle, V., Plantegenest, M., Clement, L.W., Dennis, C., Palmer, C., Oñate, J.J., Guerrero, I., Hawro, V., Aavik, T., Thies, C., Flohre, A., Hånke, S., Fischer, C., Goedhart, P.W., Inchausti, P., 2010. Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic Appl. Ecol.* 11, 97-105. doi:10.1016/j.baae.2009.12.001
- Gholami, S., Sayad, E., Gebbers, R., Schirrmann, M., Joschko, M., Timmer, J., 2016. Spatial analysis of riparian forest soil macrofauna and its relation to abiotic soil properties. *Pedobiologia (Jena)*. 59, 27-36. doi:10.1016/j.pedobi.2015.12.003
- Giller, K.E., Andersson, J.A., Corbeels, M., Kirkegaard, J., Mortensen, D., Erenstein, O., Vanlauwe, B., 2015. Beyond conservation agriculture. *Front. Plant Sci.* 6, 1-14. doi:10.3389/fpls.2015.00870
- Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M., Titttonell, P., 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *F. Crop. Res.* 114, 23-34. doi:10.1016/j.fcr.2009.06.017
- Gillison, A., Jones, D., Susilo, F., Bignell, D., 2003. Vegetation indicates diversity of soil macroinvertebrates: a case study with termites along a land-use intensification gradient in lowland Sumatra. *Org. Divers. Evol.* 3, 111-126. doi:10.1078/1439-6092-00072
- Gizzi, A.H., Castillo Álvarez, H.A., Manetti, P.L., López, A.N., Clemente, N.L., Studdert, G.A., 2009. Caracterización De La Meso Y Macrofauna Edáfica En Sistemas De Cultivo Del Sudeste Bonaerense. *Cienc. del Suelo* 27, 1-9.
- Gliessman-Stephen, R., 2002. Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible., *Diversidad y estabilidad del agroecosistema*. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2
- Google Inc., 2017. Google Earth Pro.
- Grisso, R., Alley, M., Holshouser, D., Thomason, W., 2009. Precision farming tools: soil electrical conductivity. *Virginia Coop. Ext.* 442, 1-6.
- Gutiérrez, A., Ordoñez, J., 2011. Evolución Reciente y Situación Actual del Sistema Alimentario Venezolano (SAV). Corporación Parque Tecnológico

de Mérida - ULA., Mérida. Venezuela.

- Havlicek, E., 2012. Soil biodiversity and bioindication: From complex thinking to simple acting. *Eur. J. Soil Biol.* 49, 80-84. doi:10.1016/j.ejsobi.2012.01.009
- Heanes, D., 1984. Determination of total organic-C in soil by an improved chromic acid digestion and spectrophotometric procedure. *Comm. Soil Sci. Plant. Anal.* 15, 1191-1213.
- Hernández, R.M., Lozano, Z., Toro, M., Bravo, C., Morales, J., Rivero, C., Salazar, J., Ojeda, A., Ramírez, E., Cáchica, H., Gonzalez, I., Herrera, P., Arias, L., Gonzalez, R., Correa, M., Delgado, M., Aular, M., Mora, R., Garcia, S., Figuera, C., Padrino, M., Rebolledo, M., Castro, I., Sánchez, G.K., Osorio, E., Alba, A., Torres, A., 2011. Manejo Agroecológico de suelos de sabanas bien drenadas con unidades de producción cereal-ganado. Informe Final - Proyecto G-2002000398. Caracas.
- Hernández-Hernández, R.M., 2008. Dinámica y manejo de la materia orgánica en suelos de sabanas bien drenadas. *Acta Biológica Venez.* 28, 69-84.
- Hernández-Hernández, R.M., López-Hernández, D., 2002. El tipo de labranza como agente modificador de la materia orgánica: un modelo para suelos de sabana de los llanos centrales venezolanos. *Interciencia* 27, 529-536.
- Hernández-Hernández, R.M., Morros, M.E., Bravo, C., Lozano, Z., Herrera, P., Ojeda, A., Morales, J., Birbe, B., 2011. La integración del conocimiento local y científico en el manejo sostenible de suelos en agroecosistemas de sabanas. *Interciencia* 36, 104-112.
- Huber, O., Alarcón, C., 1988. Mapa de Vegetación de Venezuela, 1: 2.000.000. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Caracas, Venezuela.
- Huerta, E., van der Wal, H., 2012. Soil macroinvertebrates' abundance and diversity in home gardens in Tabasco, Mexico, vary with soil texture, organic matter and vegetation cover. *Eur. J. Soil Biol.* 50, 68-75. doi:10.1016/j.ejsobi.2011.12.007
- Jeffries, P., Barea, J.M., 1994. Biogeochemical cycling and arbuscular mycorrhizas in the sustainability of plant-soil systems, en: Gianinazzi, S., Schüepp, H. (Eds.), *Impact of Arbuscular Mycorrhizas on Sustainable Agriculture and Natural Ecosystems*. Birkhäuser Basel, Basel, pp. 101-115. doi:10.1007/978-3-0348-8504-1_9
- Jiménez, J., Thomas, R., 2003. El Arado Natural: Las Comunidades de Macroinvertebrados del Suelo en las Sabanas Neotropicales de Colombia. CIAT. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2
- Jiménez, J., 2009. La biodiversidad del suelo: la gran desconocida [WWW Document]. Aragon Investig. URL <http://www.aragoninvestiga.org/La-biodiversidad-del-suelo-la-gran-desconocida/> (accedido 2.19.16).
- Jiménez, J.J., Decaëns, T., Lavelle, P., Rossi, J.-P., 2014. Dissecting the multi-scale spatial relationship of earthworm assemblages with soil environmental variability. *BMC Ecol.* 14, 26. doi:10.1186/s12898-014-0026-4

- Jiménez, J.J., Decaëns, T., Rossi, J.P., 2006. Stability of the spatio-temporal distribution and niche overlap in neotropical earthworm assemblages. *Acta Oecologica* 30, 299-311. doi:10.1016/j.actao.2006.06.008
- Jiménez, J.J., Decaëns, T., Thomas, R.J., Lavelle, P., 2003. La Macrofauna del Suelo: Un Recurso Natural Aprovechable pero Poco Conocido, en: JIMENEZ, J., THOMAS, R. (Eds.), *El Arado Natural: Las Comunidades de Macroinvertebrados del Suelo en las Sabanas Neotropicales de Colombia*. CIAT, Cali, p. 17.
- Jiménez, R., González-Quñones, V., 2006. La calidad de los suelos como medida para su conservación. *Edafología* 13, 125-138.
- Joschko, M., Gebbers, R., Barkusky, D., Timmer, J., 2010. The apparent electrical conductivity as a surrogate variable for predicting earthworm abundances in tilled soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, 584–590. doi:10.1002/jpln.200800071
- Jouquet, P., Blanchart, E., Capowiez, Y., 2014. Utilization of earthworms and termites for the restoration of ecosystem functioning. *Appl. Soil Ecol.* 73, 34-40. doi:10.1016/j.apsoil.2013.08.004
- Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlöf, J., Lavelle, P., Lepage, M., 2006. Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Appl. Soil Ecol.* 32, 153-164. doi:10.1016/j.apsoil.2005.07.004
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E., 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x
- Kooyman, C., Onck, R.F.M., 1987. The interactions between termite activity , agricultural practices and soil characteristics in Kisii District, Kenya, *Agricultural University Wageningen Papers*. Agricultural University Wageningen, Wageningen, Netherlands.
- Köppen, W., 1900. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geogr. Z.* 6, 593-611.
- Lal, R., 1988. Effects of macrofauna on soil properties in tropical ecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 24, 101-116. doi:10.1016/0167-8809(88)90059-X
- Lavelle, P., 1983a. The Soil Fauna of Tropical Savannas. II: The earthworms, en: Bourlière, F. (Ed.), *Tropical savannas, Ecosystems of the world*. Elsevier Scientific Pub. Co., California. USA, pp. 485-504.
- Lavelle, P., 1983b. The Soil Fauna of Tropical Savannas. I. The Community Structure, en: Bourlière, F. (Ed.), *Tropical savannas, Ecosystems of the world*. Elsevier Scientific Pub. Co., California. USA, pp. 477-488.
- Lavelle, P., 1981. Strategies de reproduction chez les vers de terre. *Acta Oecologica - Oecologia Gen.* 2, 117-133.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, W., Roger, P., Ineson, P., Heal, O.W., Dhillon, S., 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *Eur. J. Soil Biol.* 33, 159-193.

- Lavelle, P., Dangerfield, M., Fragoso, C., Eschenbrenner, V., Lopez-Hernandez, D., Pashanasi, B., Brussaard, L., 1994. The relationship between soil macrofauna and tropical soil fertility., en: Woomer, P.L., Swift, M.J. (Eds.), The biological management of tropical soil fertility. Tropical Soil Biology and Fertility Programme., C. Sayce Publishing., pp. 137-169.
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. Eur. J. Soil Biol. 42, S3-S15. doi:10.1016/j.ejsobi.2006.10.002
- Lavelle, P., Lepage, M., Cambefort, Y., 1993. Soil Macrofauna, en: Anderson, J.M., Ingram, J.S.I. (Eds.), Tropical Soil Biology and Fertility. A Handbook of Methods. C.A.B. International, pp. 44-46.
- Lavelle, P., Senapati, B., Barros, E., 2003. Soil Macrofauna, en: Schroth, G., Sinclair, F. (Eds.), Trees, Crops and Soil Fertility. Concepts and research methods. IUFRO, TSBF-CIAT, CABI Publishing, Nairobi. Kenya, p. 430.
- Lavelle, P., Spain, A., Blouin, M., Brown, G., Decaëns, T., Grimaldi, M., Jiménez, J.J., McKey, D., Mathieu, J., Velasquez, E., Zangerlé, A., 2016. Ecosystem Engineers in a Self-organized Soil. Soil Sci. 181, 91-109. doi:10.1097/SS.0000000000000155
- Lavelle, P., Velasquez, E., Andrade, M., 2009. «Indicating soil quality and the GISQ»: Reply to the comments by Rossi et al. Soil Biol. Biochem. 41, 446-447. doi:10.1016/j.soilbio.2008.10.018
- Leps, J., Smilauer, P., 2003. Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO. Cambridge University Press, Cambridge. doi:10.1017/CBO9780511615146
- Li, L., Sun, J., Zhang, F., Li, X., Yang, S., Rengel, Z., 2001. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping. F. Crop. Res. 71, 123-137. doi:10.1016/S0378-4290(01)00156-3
- Liu, L., 2013. Development and calibration of indicators of the quality of agricultural soils of the South of China. Université Pierre Et Marie Curie.
- Liu, R., Zhao, H., Zhao, X., 2011. Desertification impact on macro-invertebrate diversity in grassland soil in Horqin, northern China. Procedia Environ. Sci. 10, 1401-1409. doi:10.1016/j.proenv.2011.09.224
- Lopez-Hernández, D., 1995. Impact of agriculture and livestock production on tropical soils in Latin America, en: Turner, B., Gómez-Sal, A., González Bernáldez, F., di Castri, F. (Eds.), Global land use change: A perspective from the Columbian Encounter. Editorial CSIC - CSIC Press, Madrid. España, pp. 405-418.
- López-Hernández, D., 2003. La actividad de la macrofauna (Termitas y Oligoquetos) en los suelos de sabana. Venesuelos 11, 15-25.
- López-Hernández, D., Hernández-Hernández, R.M., Brossard, M., 2005. Historia del uso reciente de tierras de las sabanas de américa del sur. Estudios de casos en sabanas del orinoco. Interciencia 30, 623-630.
- López-Hernández, D., Ojeda, A., 1996. Alternativas en el manejo agroecológico de los suelos de las sabanas del norte de suramerica. Ecotropicos 9, 101-

- Lozano, Z., Hernández, R.M., Bravo, C., Delgado, M., 2011. Cultivos de cobertura y fertilización fosfórica y su efecto sobre algunas propiedades químicas del suelo en un sistema mixto maíz-ganado. *Venesuelos* 19, 45-54.
- Lozano, Z., Mogollon, A., Hernandez, R.M., Bravo, C., Ojeda, A., Torres, A., Rivero, C., Toro, M., 2010a. Cambios En Las Propiedades Químicas De Un Suelo De Sabana Luego De La Introduccion De Pasturas Mejoradas. *Bioagro* 22, 135-144.
- Lozano, Z., Romero, H., Bravo, C., 2010b. Influence of cover crops and grazing on soil physical properties in savanna soil. *Agrociencia* 44, 135-146.
- Ludlow, M., Chu, A., Clements, R., Kerslake, R., 1983. Adaptation of Species of *Centrosema* to Water Stress. *Aust. J. Plant Physiol.* 10, 119. doi:10.1071/PP9830119
- Marichal, R., Grimaldi, M., Feijoo, M.A., Oszwald, J., Praxedes, C., Ruiz Cobo, D.H., del Pilar Hurtado, M., Desjardins, T., da Silva Junior, M.L., da Silva Costa, L.G., Miranda, I.S., Delgado Oliveira, M.N., Brown, G.G., Tsélouiko, S., Martins, M.B., Decaëns, T., Velasquez, E., Lavelle, P., 2014. Soil macroinvertebrate communities and ecosystem services in deforested landscapes of Amazonia. *Appl. Soil Ecol.* 83, 177-185. doi:10.1016/j.apsoil.2014.05.006
- Martín Cano, J., Ferrín, J.M., García-Barros, E., García-Ocejo, A., Gurrea, P., Luciáñez, M.J., Munguira, M.L., Pérez Barroeta, F., Ruiz Ortega, M., Sanz Benito, M.J., Simón, J.C., Viejo, J.L., 1995. Las comunidades de insectos del Parque Regional de la Cuenca Alta del Manzanares (centro de España): estado de conservación. *Graellsia* 51, 101-111. doi:10.3989/graellsia.1995.v51.i0.400
- McIntosh, R.P., 1967. The Continuum Concept of Vegetation. *Bot. Rev.* 33, 130-187.
- Mhazo, N., Chivenge, P., Chaplot, V., 2016. Tillage impact on soil erosion by water: Discrepancies due to climate and soil characteristics. *Agric. Ecosyst. Environ.* 230, 231-241. doi:10.1016/j.agee.2016.04.033
- Mitchell, J.P., Shrestha, A., Mathesius, K., Scow, K.M., Southard, R.J., Haney, R.L., Schmidt, R., Munk, D.S., Horwath, W.R., 2017. Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA. *Soil Tillage Res.* 165, 325-335. doi:10.1016/j.still.2016.09.001
- Moço, M.K.S., Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C., Machado, R.C.R., Baligar, V.C., 2010. Relationships between invertebrate communities, litter quality and soil attributes under different cacao agroforestry systems in the south of Bahia, Brazil. *Appl. Soil Ecol.* 46, 347-354. doi:10.1016/j.apsoil.2010.10.006
- Moghimian, N., Habashi, H., Kheiri, M., 2013. Comparison of Soil Macro Fauna Biodiversity in Broad Leaf and Needle Leaf Afforested Stands. *Mol. Soil*

- Montilla, A., 2010. Contribución al estudio de las Sabanas de Venezuela. *Geoenseñanza* 15, 35-48.
- Morales, J., Sarmiento, L., 2002. Dynamics of soil macroinvertebrates and its relationships to vegetation in a secondary succession of the Venezuelan Paramo. *Ecotropicos* 15, 99-110.
- Moura, E.G., Aguiar, A. das C.F., Piedade, A.R., Rousseau, G.X., 2015. Contribution of legume tree residues and macrofauna to the improvement of abiotic soil properties in the eastern Amazon. *Appl. Soil Ecol.* 86, 91-99. doi:10.1016/j.apsoil.2014.10.008
- Muñoz-Riveaux, S., Naranjo-López, C., Garcés-González, G., González Lazo, D., Rodríguez-Montoya, L., Musle-Cordero, Y., 2003. Evaluación de la calidad del agua utilizando los macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores. *Rev. Chapingo Ser. Ciencias For. y del Ambient.* 9, 147-153.
- Nahmani, J., Lavelle, P., Rossi, J.P., 2006. Does changing the taxonomical resolution alter the value of soil macroinvertebrates as bioindicators of metal pollution? *Soil Biol. Biochem.* 38, 385-396. doi:10.1016/j.soilbio.2005.04.037
- Neet, C.R., 1996. Spiders as indicator species : lessons from two case studies. *Rev. SUISSE Zool.* 501-510.
- Ochoa-Hueso, R., Rocha, I., Stevens, C.J., Manrique, E., Luciañez, M.J., 2014. Simulated nitrogen deposition affects soil fauna from a semiarid Mediterranean ecosystem in central Spain. *Biol. Fertil. Soils* 50, 191-196. doi:10.1007/s00374-013-0838-y
- Odum, E.P., Sarmiento, F.O., 1998. *Ecología: el puente entre ciencia y sociedad*, 1.^a ed. McGraw-Hill Interamericana, México, DF.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Circular (United States. Dept. of Agriculture).
- Otavo, S.E., Parrado-Rosselli, Á., Ari Noriega, J., 2013. Superfamilia Scarabaeoidea (Insecta: Coleoptera) como elemento bioindicador de perturbación antropogénica en un parque nacional amazónico. *Rev. Biol. Trop.* 61, 735-752.
- Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., Grace, P., 2014. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agric. Ecosyst. Environ.* 187, 87-105. doi:10.1016/j.agee.2013.10.010
- Paul, B.K., Vanlauwe, B., Hoogmoed, M., Hurisso, T.T., Ndabamenye, T., Terano, Y., Six, J., Ayuke, F.O., Pulleman, M.M., 2015. Exclusion of soil macrofauna did not affect soil quality but increased crop yields in a sub-humid tropical maize-based system. *Agric. Ecosyst. Environ.* 208, 75-85. doi:10.1016/j.agee.2015.04.001
- Peiretti, R., Dumanski, J., 2014. The transformation of agriculture in Argentina through soil conservation. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2, 14-20.

doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30010-1](http://dx.doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30010-1)

- Pelosi, C., Pey, B., Hedde, M., Caro, G., Capowiez, Y., Guernion, M., Peigné, J., Piron, D., Bertrand, M., Cluzeau, D., 2014. Reducing tillage in cultivated fields increases earthworm functional diversity. *Appl. Soil Ecol.* 83, 79-87. doi:10.1016/j.apsoil.2013.10.005
- Piccoli, I., Schjønning, P., Lamandé, M., Furlan, L., Morari, F., 2017. Challenges of conservation agriculture practices on silty soils. Effects on soil pore and gas transport characteristics in North-eastern Italy. *Soil Tillage Res.* 172, 12-21. doi:10.1016/j.still.2017.05.002
- Pinzón, S., Guillaume, X.R., Rocha da Piedade, A., Celentano, D., Corrêa Zelarayán, M., Braun, H., 2014. La macrofauna del suelo como indicadora de degradación de bosques ribereños en la amazonia oriental brasileira. *Rev. Fac. Agron.* 114, 49-60.
- Pizarro, E., Valle, C.B. do, Keller-Grein, G., Schultze-Kraft, R., Zimer, A., 1996. Regional experience with Brachiaria: tropical America-savannas, en: Miles, J.W., Maass, B.L., Valle, C.B. do, Kumble, V. (Eds.), *Brachiaria: Biology, agronomy, and improvement*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Campo Grande, BR: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA), Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte (CNPGC), Cali, pp. 225-246.
- Pla, I., 1990. La degradación y el desarrollo agrícola de Venezuela. *Agron. Trop.* 40, 7-27.
- Plá, I., 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Rev. Alcance. Fac. Agron. UCV* 32, 91.
- Pla, I., Florentino, A., Lobo, D., 1981. Regulación del régimen hídrico de suelos bajo agricultura de secano en Venezuela, mediante la aplicación superficial de emulsiones de asfalto. *Rev. Fac. Agron. UCV* 12, 137-163.
- PlantUse Contributors, 2016. *Centrosema macrocarpum* (PROSEA) [WWW Document]. PlantUse. URL [http://uses.plantnet-project.org/e/index.php?title=Centrosema_macrocarpum_\(PROSEA\)&oldid=220944](http://uses.plantnet-project.org/e/index.php?title=Centrosema_macrocarpum_(PROSEA)&oldid=220944) (accedido 8.13.17).
- Pulleman, M., Creamer, R., Hamer, U., Helder, J., Pelosi, C., Pérès, G., Rutgers, M., 2012. Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services-an overview of European approaches. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4, 529-538. doi:10.1016/j.cosust.2012.10.009
- Quintanilla-Tornel, M.A., Wang, K.-H., Tavares, J., Hooks, C.R.R., 2016. Effects of mulching on above and below ground pests and beneficials in a green onion agroecosystem. *Agric. Ecosyst. Environ.* 224, 75-85. doi:10.1016/j.agee.2016.03.023
- Ramírez, E., 2015. Sincronización de los Componentes Suelo-Planta-Animal en Agroecosistemas de Sabanas Bien Drenadas. Universidad Central de Venezuela.
- Rendón, S., Artunduaga, F., Ramírez, R., Quiroz, A., Leiva, I., 2011. The

- Macroinvertebrates as Indicators of the Quality of Soil in Blackberry, Grass and Avocado Crops. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 64, 5793-5802.
- Rippstein, G., Amézquita, E., Escobar, G., Grollier, C., 2001. Condiciones naturales de la sabana, en: Rippstein, G., Escobar, G., Motta, F. (Eds.), *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. CIAT - CIRAD, Cali, Colombia, p. 308.
- Román-Garrido, M.C., Chamorro-Pérez, K., Martínez-Hernández, N.J., 2016. Diversidad de Reduviidae (Hemiptera : Heteroptera) en tres fragmentos de bosque tropical (Bst) en el Departamento Atlántico, Colombia. *Boletín Científico Cent. Museos* 20, 250-272.
- Rousseau, L., Fonte, S.J., Téllez, O., van der Hoek, R., Lavelle, P., 2013. Soil macrofauna as indicators of soil quality and land use impacts in smallholder agroecosystems of western Nicaragua. *Ecol. Indic.* 27, 71-82. doi:10.1016/j.ecolind.2012.11.020
- Rückamp, D., 2011. Role of termites for the distribution patterns of carbon and phosphorus fractions and the genesis of tropical soils, Brazil. University of Bonn.
- Ruiter, P., Neutel, A., Moore, J., 1997. Soil food web interactions and modeling, en: Benckiser, G. (Ed.), *Fauna in Soil Ecosystems: Recycling Processes, Nutrient Fluxes and Agricultural Production*. CRC Press, New York. USA, pp. 363 - 386.
- Ruiz, N., Lavelle, P., Jiménez, J.J., 2008. Soil macrofauna field manual. FAO, Roma, Italia.
- Ruiz-Cobo, D.H., Feijoo, A., Rodríguez, C., 2010. Comunidades de macroinvertebrados edáficos en diferentes sistemas de uso del terreno en la cuenca del río Otún, Colombia. *Acta Zoológica Mex.* 165-178.
- Rusu, T., 2014. Energy efficiency and soil conservation in conventional, minimum tillage and no-tillage. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2, 42-49. doi:10.1016/S2095-6339(15)30057-5
- Sanabria, C., Lavelle, P., Fonte, S.J., 2014. Ants as indicators of soil-based ecosystem services in agroecosystems of the Colombian Llanos. *Appl. Soil Ecol.* 84, 24-30. doi:10.1016/j.apsoil.2014.07.001
- Santorufu, L., Van Gestel, C.A.M., Rocco, A., Maisto, G., 2012. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality. *Environ. Pollut.* 161, 57-63. doi:10.1016/j.envpol.2011.09.042
- Sarmiento, G., 1996. Aspecto de la Biodiversidad en las Sabanas Tropicales de Venezuela, en: Samiento, G., Cabido, M. (Eds.), *Biodiversidad y Funcionamiento de Pastizales y Sabanas en América Latina, estado del conocimiento y perspectivas de investigación*. CYTED, CIELAT, Mérida. Venezuela, p. 318.
- Sarmiento, G., 1984. *The Ecology of Neotropical Savannas*, 1.^a ed. Harvard University Press.
- Schon, N.L., Mackay, A.D., Minor, M.A., 2012. Vulnerability of soil invertebrate communities to the influences of livestock in three grasslands. *Appl. Soil*

- Ecol. 53, 98-107. doi:10.1016/j.apsoil.2011.11.003
- Schultze-Kraft, R., Clements, R.J., 1990. *Centrosema: Biology, Agronomy, and Utilization*, CIAT publication. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.
- Scopel, E., Triomphe, B., Affholder, F., Da Silva, F.A.M., Corbeels, M., Xavier, J.H.V., Lahmar, R., Recous, S., Bernoux, M., Blanchart, E., de Carvalho Mendes, I., De Tourdonnet, S., 2013. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 113-130. doi:10.1007/s13593-012-0106-9
- Shao, Y., Xie, Y., Wang, C., Yue, J., Yao, Y., Li, X., Liu, W., Zhu, Y., Guo, T., 2016. Effects of different soil conservation tillage approaches on soil nutrients, water use and wheat-maize yield in rainfed dry-land regions of North China. *Eur. J. Agron.* 81, 37-45. doi:10.1016/j.eja.2016.08.014
- Shaxson, F., Barber, R., 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal: el significado de la porosidad del suelo, 1.^a ed, Boletín de suelos de la FAO. FAO, ROMA. ITALY.
- Sisay, M., Ketema, H., 2015. Variation in Abundance and Diversity of Soil Invertebrate Macro-Fauna and Some Soil Quality Indicators under Agroforestry Based Conservation Tillage and Maize Based Conventional Tillage in Southern Ethiopia. *Intern. ional J. Multidiscip. Res. Dev.* 2, 100-107.
- Snyder, B.A., Hendrix, P.F., 2008. Current and Potential Roles of Soil Macroinvertebrates (Earthworms, Millipedes, and Isopods) in Ecological Restoration. *Restor. Ecol.* 16, 629-636. doi:10.1111/j.1526-100X.2008.00484.x
- Soil Survey Staff, 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Sørensen, T., 1948. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. *K. Danske Vidensk. Selsk.* 5, 1-34.
- StatSoft, I., 2001. *STATISTICA (data analysis software system)*, version 6.
- Stork, N.E., Eggleton, P., 1992. Invertebrates as Determinants and Indicators of Soil Quality. *Am. J. Altern. Agric.* 7, 38-47. doi:10.1017/S0889189300004446
- Suárez, J.C., Durán, E.H., Rosas, G., 2015. Macrofauna edáfica asociada a sistemas agroforestales en la Amazonia Colombiana. *Acta Agronómica* 64, 214-220. doi:10.15446/acag.v64n3.38033
- Swift, M., 2003. Prólogo, en: Jimenez, J., Thomas, R. (Eds.), *El Arado Natural: Las Comunidades de Macroinvertebrados del Suelo en las Sabanas Neotropicales de Colombia*. CIAT, Cali. Colombia, p. vii.
- Swift, M.J., Heal, O.W., Anderson, J.M., 1979. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*, Decomposition in Terrestrial Ecosystems. University of California Press, California. USA.

- Tao, H.-H., Slade, E.M., Willis, K.J., Caliman, J.-P., Snaddon, J.L., 2016. Agriculture , Ecosystems and Environment Effects of soil management practices on soil fauna feeding activity in an Indonesian oil palm plantation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 218, 133-140. doi:10.1016/j.agee.2015.11.012
- Ter Braak, C.J.F., Smilauer, P., 2002. CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Microcomputer Power, Ithaca, NY.
- Third World Network, SOCLA, 2015. Agroecology: Key Concepts, Principles and Practices, Third World Network and Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología. Third World Network (TWN), Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología (SOCLA), Penang, Malaysia.
- Thomas, C., 1998. The spatial distribution of termites in shortgrass steppe: a geostatistical approach. *Oecologia* 114, 410. doi:10.1007/s004420050464
- Triplehorn, C.A., Johnson, N.F., Borror, D.J., 2005. Borror and DeLong's Introduction to the Study of Insects, 7th ed. Thompson Brooks/Cole, CA, USA.
- Umeh, V.C., Ivbijaro, M.F., Ewete, F.K., 1999. Relationship Between Characteristics of Macrotermes spp. Mound Materials and Their Surrounding Soils. *Int. J. Trop. Insect Sci.* 19, 251-255. doi:10.1017/S174275840001955X
- Unigarro, A., Burnado, H., Sáñez, M., 2012. Evaluación de la calidad de suelos Dystric cryandept en el santuario de la flora y fauna Galeras, Nariño. *Rev. Ciencias Agrícolas* 23, 94-106.
- Vasconcellos, R.L.F.F., Segat, J.C., Bonfim, J.A., Baretta, D., Cardoso, E.J.B.N.B.N., 2013. Soil macrofauna as an indicator of soil quality in an undisturbed riparian forest and recovering sites of different ages. *Eur. J. Soil Biol.* 58, 105-112. doi:10.1016/j.ejsobi.2013.07.001
- Vera, S., Lozano, Z., Lobo, D., Bravo, C., Hernández, R., 2012. Propiedades físicas del suelo y distribución de raíces de maíz bajo diferentes tipos de cobertura y fertilización en un sistema conservacionista cereal-ganado 38, 49-63.
- Verzani, J., 2014. Using R for Introductory Statistics, Second Edition, 2th Editio. ed, Chapman & Hall/CRC The R Series. CRC Press, Boca Ratón, FL, USA.
- Vitousek, P.M., Porder, S., Houlton, B.Z., Chadwick, O.A., 2010. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen–phosphorus interactions. *Ecol. Appl.* 20, 5-15. doi:10.1890/08-0127.1
- Viviani, V.R., Santos, R.M. dos, 2012. Bioluminescent Coleoptera of Biological Station of Boracéia (Salesópolis, SP, Brazil): diversity, bioluminescence and habitat distribution. *Biota Neotrop.* 12, 21-34. doi:10.1590/S1676-06032012000300001
- Wardle, D.A., 2006. The influence of biotic interactions on soil biodiversity. *Ecol. Lett.* 9, 870-886. doi:10.1111/j.1461-0248.2006.00931.x
- Williams, L.J., Abdi, H., 2010. Fisher's Least Significant Difference (LSD) Test.

Encycl. Res. Des. 1-6.

- Wolters, V., Eckschmitt, K., 1997. Gastropods, Isopods, Diplopods, and Chilopods: Neglected Groups of the Decomposer Food Web., en: Benckiser, G. (Ed.), *Fauna in Soil Ecosystems: Recycling Processes Nutrient Fluxes and Agricultural Production*. Marcel Dekker Inc., New York. USA, pp. 265 - 306.
- Wu, P., Liu, S., Liu, X., 2012. Composition and spatio-temporal changes of soil macroinvertebrates in the biodiversity hotspot of northern Hengduanshan Mountains, China. *Plant Soil* 357, 321-338. doi:10.1007/s11104-012-1166-y
- Wu, P., Zhang, H., Wang, Y., 2015. The response of soil macroinvertebrates to alpine meadow degradation in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Appl. Soil Ecol.* 90, 60-67. doi:10.1016/j.apsoil.2015.02.006
- Yan, S., Singh, A.N., Fu, S., Liao, C., Wang, S., Li, Y., Cui, Y., Hu, L., 2012. A soil fauna index for assessing soil quality. *Soil Biol. Biochem.* 47, 158-165. doi:10.1016/j.soilbio.2011.11.014
- Zerbino, M.S., 2010. Evaluacion de la macrofauna del suelo en rotaciones cultivos-pasturas con laboreo convencional. *Acta Zoológica Mex.* 2, pp. 189-202.
- Zhang, X., Xin, X., Zhu, A., Zhang, J., Yang, W., 2017. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain. *CATENA* 156, 176-183. doi:10.1016/j.catena.2017.04.012
- Zhu, X., Zhu, B., 2015. Diversity and abundance of soil fauna as influenced by long-term fertilization in cropland of purple soil, China. *Soil Tillage Res.* 146, 39-46. doi:10.1016/j.still.2014.07.004